



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

EXPERIMENTÁLNÍ HARDWAROVÝ HUDEBNÍ NÁSTROJ

EXPERIMENTAL HARDWARE MUSICAL INSTRUMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Chaňo

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Petr Chaňo

ID: 174452

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Experimentální hardwarový hudební nástroj

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je realizovat experimentální elektroakustický hardwarový hudební nástroj; experimentálnost spočívá jednak v kombinaci syntetizéru a sekvenceru s metronomem, jednak ve způsobu jeho ovládání.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GUŠTAR, M. Elektrofony I. Uvnitř, Praha, 2006. ISBN 978-80-239-8446-0.

[2] GUŠTAR, M. Elektrofony II. Uvnitř, Praha, 2008. ISBN 978-80-239-8447-7.

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce byl návrh a konstrukce hudebního nástroje, který se vyznačuje experimentálností spočívající v kombinaci syntezátoru a sekvenceru, ovládáním, vzhledem. Samotný návrh a konstrukci předchází teoretický úvod dotýkající se témat dělení nástrojů, hudební teorie, generování a modulace zvukových signálů. V teoretické části jsou dále rozebrány části navrhovaného nástroje, jakými jsou například mikrokontrolér, D/A převodník, a také zvolené principy umožňující realizaci nástroje s požadovanými vlastnostmi – zapojení operačního zesilovače, frekvenční filtry, princip přímé číslicové syntézy. V praktické části se nachází popis jednotlivých částí nástroje umožňujících sestavení funkčního celku přecházející v popis softwarového řešení.

Klíčová slova

Nástroj, syntezátor, sekvencér, mikrokontrolér, DDS

Abstract

The main aim of the bachelor thesis was to design and build a musical instrument that will have a signs of the experimentalism consist of combination synthesizer and sequencer, tuning, unusual kind of controls and its look. At the top of this work is the theoretical introduction to the musical instruments and to the process of generating and modulating sound. There is also written information about parts that the instrument consists of (microcontroller, D/A converter), principles that leads to being able to create this instrument (operational amplifiers, frequency filters, DDS) in the theoretical part. The description of the components is in the practical part followed by the information about the circuits at this instrument and about software solution as well.

Key words

Instrument, synthesizer, sequencer, microcontroller, DDS

CHAŇO, P. Experimentální hardwarový hudební nástroj. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 78 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Experimentální hardwarový hudební nástroj nebo zvukový zdroj“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. MgA. Mgr. Danovi Dlouhému, Ph.D, za podporu a věcné připomínky při zpracovávání této práce, dále bych chtěl také poděkovat Václavu Drdovi za trpělivost a čas, který mi v souvislosti s touto prací věnoval.

V Brně dne

.....

podpis autora

Obsah

1	Teoretická část.....	12
1.1	Dělení hudebních nástrojů	12
1.2	Tón	16
1.3	Hudební signál	18
1.4	Generování zvuku v elektronických nástrojích	21
1.5	Použití oscilátoru	23
1.6	Základní průběhy signálů.....	24
1.7	Filtry.....	26
1.8	Zapojení operačního zesilovače.....	27
1.9	Piezoelektrický měnič	28
1.10	Generování zvuku pomocí přímé číslicové syntézy (DDS).....	29
1.11	Mikrokontrolér	29
1.12	Číslicově analogový převodník	31
1.13	Displej	34
2	Praktická část.....	36
2.1	Generování zvuku	37
2.2	Blokové schéma nástroje	37
2.3	Periferie nástroje	38
2.4	Popis jednotlivých částí navrženého obvodu.....	40
2.5	Ovládací prvky nástroje a možnosti nastavení	46
2.6	Obsluha nástroje	49
2.7	Měření v obvodu	51
2.8	Software	60
3	Závěr.....	69
	Seznam použitých zdrojů.....	70
	Seznam použitých zkratk	73

Seznam příloh	75
A. Snímky kombinací průběhů	75
B. Schéma obvodu	78
C. Přiložené CD	78

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Schéma analogového syntezátoru.....	15
Obr. 1.2: Dynamický náhled na signál [14].....	19
Obr. 1.3: Dělení signálů [14]	20
Obr. 1.4: Sinusový signál.....	25
Obr. 1.5: Pilovitý průběh signálu.....	25
Obr. 1.6: Trojúhelníkový průběh signálu.....	25
Obr. 1.7: Obdélníkový průběh signálu.....	26
Obr. 1.8: Dolní propust	27
Obr. 1.9: Horní propust.....	27
Obr. 1.10: Základní zapojení OZ (invertující, neinvertující).....	28
Obr. 1.11: Blokový diagram DDS	29
Obr. 1.12: ATmega 32A	31
Obr. 1.13: Blokové schéma D/A převodníku [27].....	33
Obr. 1.14: Název pinů D/A převodníku [27]	33
Obr. 1.15: Blokový diagram M/S	34
Obr. 2.1: Nástroj	36
Obr. 2.2: Blokové schéma nástroje	38
Obr. 2.3: Reset, rezonátor, napájení.....	40
Obr. 2.4: Zdroj napětí	41
Obr. 2.5: Tlačítka	41
Obr. 2.6: D/A převodník	42
Obr. 2.7: Výstupní obvod nástroje.....	43
Obr. 2.8: Vstupní obvod piezoměniče	44
Obr. 2.9: Obvod s tranzistorem.....	45
Obr. 2.10: Grafický návrh nástroje	46
Obr. 2.11: Příklad nastavovaného parametru na displeji	47
Obr. 2.12: Pad opatřený piezoměničem a mono jackem	48
Obr. 2.13: Měření na piezoměniči	51
Obr. 2.14: Schéma měřeného obvodu s diodou	52
Obr. 2.15: Měření v obvodu s diodou	52
Obr. 2.16: Schéma měřeného obvodu s RC členem	53
Obr. 2.17: Měření v obvodu s RC členem	53
Obr. 2.18: Schéma obvodu piezoměniče	54
Obr. 2.19: Měření vstupního obvodu.....	54
Obr. 2.20: Schodovitý průběh signálu	55
Obr. 2.21: Sinusový průběh – nejnižší frekvence	56
Obr. 2.22: Sinusový průběh – schodovitost signálu	57
Obr. 2.23: Trojúhelníkový průběh	58
Obr. 2.24: Obdélníkový průběh	59
Obr. 2.25: Pilovitý průběh	60
Obr. A.1: Sinusový a trojúhelníkový signál	75
Obr. A.2: Sinusový a trojúhelníkový signál v protifázi	76

Obr. A.3: Sinusový a obdélníkový signál	77
Obr. A.4: Sinusový a obdélníkový signál v protifázi	78

Úvod

Tato bakalářská práce reflektuje pokyny pro vypracování, které kladly za cíl realizaci experimentálního hardwarového hudebního nástroje, jehož experimentálnost spočívá jednak v kombinaci syntezátoru a sekvenceru, a především pak ve způsobu jeho ovládání a možnostech nastavení. Jako na syntezátor je na nástroj možné nahlížet z toho důvodu, že disponuje dvěma virtuálními oscilátory, které mohou generovat celkem čtyři různé druhy průběhů signálu. Zvolením jednoho z průběhů signálu generovaného oscilátorem, výšky tónu (společné pro oba oscilátory), nastavením míry vzájemného rozladění oscilátorů a fázového posunu uživatel vytvoří jeden z šestnácti kroků, které jsou po spuštění přehrány – odtud plyne podobnost nástroje se sekvencerem. Tyto signály se před koncovým napěťovým sledovačem sloučí a jsou připravené k reprodukci, případně dalšímu upravování pomocí externích zařízení na výstupu nástroje. Tento nástroj umožňuje dále nastavit tempo přehrávání sekvence. Přehrávaná sekvence se opakuje v tempu nastaveném uživatelem, dokud nedojde k jejímu přerušení, je možné nástroj využít také jako metronom hrající sekvenci v tempu zvoleném dle preferencí uživatele. Nástroj se skládá ze dvou částí; kovové, ve které je umístěn mikrokontrolér, obvod, displej a tlačítka s potenciometry, a dřevěné (nazývané pad), která je opatřena piezoměničem a slouží ke spouštění a nastavování tempa přehrávané sekvence. Obě tyto části jsou propojeny kabelem jack – jack. Hlavní motivací při návrhu a vývoji tohoto nástroje byla vidina jeho budoucího využití v hudební praxi.

V teoretické části je nastíněna historie analogových a digitálních nástrojů, problematika hudebního zvuku zaměřující se na hudební teorii. Jsou zde také popsány metody generování zvuku, základy elektrických obvodů (filtry, zapojení OZ) a stěžejní části nástroje (mikrokontrolér, D/A převodník, displej).

V praktické části jsou podrobně popsány jednotlivé funkční oddíly, představené v části teoretické. Nachází se zde blokové schéma nástroje, popis periférií nástroje, rozbor prvků sloužících k ovládání a nastavování. Dále je popsán účel jednotlivých součástí použitých v obvodech nástroje. Součástí je také popis obsluhy nástroje, který přibližuje jednotlivá nastavení parametrů kroku sekvence. Další částí je kapitola Měření v obvodu, v níž jsou okomentovány obrázky průběhů změřené osciloskopem v různých částech obvodu. Na konci praktické části je popis funkce software a jeho jednotlivých

částí, kterými jsou obsluhy přerušení, debouncing nebo samotné generování průběhu audiosignálu. Následuje závěr obsahující shrnutí vykonané práce.

1 Teoretická část

1.1 Dělení hudebních nástrojů

Moderní dělení nástrojů bylo publikováno v časopise „Zeitschrift für Ethnologie“ roku 1914, lze jej využít pro základní rozdělení typů hudebních nástrojů.

- Idiofony – samozvучné nástroje, zvuk vzniká kmitáním tělesa nástroje
- Membranofony – blanzvучné, zdrojem zvuku je kmitající membrána
- Chordofony – strunné, zvuk vzniká díky kmitající struně
- Hydrofony – vodní nástroje, zvuk vzniká kmitáním vody
- Aerofony – vzduchové nástroje, zvuk vzniká díky kmitání vzduchu
- Elektrofony – elektrické nástroje, zvuk je tvořen elektricky
- Abstraktní nástroje, u kterých je zvuk tvořen například matematicky

Další dělení nástrojů můžeme provést na základě množství současně znějících zvuků – na monofonní (jednohlasé), polyfonní (mnohohlasé), multifonní (vícehlasé) nástroje. Jednohlasé nástroje jsou schopny produkovat v daný časový okamžik pouze jeden tón, jak již název napovídá polyfonní, tedy mnohohlasé nástroje, jsou schopny produkovat v daném čase vícero tónů. Multifonní nástroje jsou kombinací monofonních a polyfonních nástrojů – disponují několika zvukovými zdroji (znak stereofonních nástrojů), které jsou při hře přeladovány (znak monofonních nástrojů). [1]

Nástroje využívající elektřinu lze rozdělit do těchto kategorií:

1.1.1 Mechanicko-elektrické nástroje

Nástroje, jejichž zvuk vzniká akustickým způsobem, elektřina je v tomto případě využita pouze pro přenos signálu – kupříkladu akustické nástroje snímané mikrofony či piezoelektrickými snímači. Elektřina v tomto případě neovlivňuje zvuk samotného nástroje. [2]

1.1.2 Elektromechanické nástroje

Nástroje vyrábějící zvuk za pomoci elektrického signálu, obvykle založené na rotaci některé z částí nástroje. Konkrétním příkladem nám mohou být Hammondovy varhany – jejich specifický zvuk vzniká díky otáčejícímu se zvukovodu umístěného u reproduktoru. [2]

1.1.3 Elektronické nástroje

Elektronické nástroje můžeme dále rozdělit na analogové, digitální a na pomezí těchto dvou skupin pak lze definovat analogově digitální nástroje. [2]

Analogové nástroje

Zvuk v analogových nástrojích je generován pouze elektrickými obvody, též nazývanými oscilátory. Kmity analogových nástrojů jsou analogií kmitů zvukových akustických nástrojů. První nástroj, který tvořil zvuk elektronickým principem, vynalezl britský fyzik William DuBoisDuddel v roce 1899. Jednalo se o tzv. Singing Arc, lampu, která produkovala nejen světlo, ale také specifický zvuk. Při odstraňování tohoto zvuku došel W. D. B. Duddel k poznatku, že dokáže ovlivnit frekvenci vycházející z nástroje. Dalším významným inovátorem na poli elektronických nástrojů byl americký vynálezce ThaddeusCahill, který v roce 1900 představil první nástroj produkující syntetickou hudbu zvaný Telharmonium. K nejznámějším nástrojům, které stály na počátku elektronických nástrojů, patří také dodnes používaný Theremin – poloha rukou hráče v blízkosti dvou antén ovlivňuje výšku a hlasitost generovaného tónu. Za zmínku pak stojí i Martenotovy vlny nebo Trautonium.¹ [3] [4] [5]

Roku 1960 sestrojil Harald Bode ModularSoundModificationSystem, který se svými funkcemi podobal nástroji dnes známému jako syntezátor. Bodeho nástroj disponoval filtry, kruhovými modulátory, sledovači frekvence a obálky, komparátory, frekvenčními děliči, generátory, VCO, směšovači a páskovou zpožďovací linkou. Dalším nástrojem byl modulární syntezátor Donalda Buchly zkonstruován v roce 1963, následován VCO a VCA sestrojeným Robertem Moogem v roce 1964. Robert Moog začal v roce 1970 vyrábět na tehdejší poměry kompaktní syntezátor s pevně danou vnitřní strukturou – Minimoog. Tento nástroj byl prvním komerčně úspěšným zařízením svého druhu. ²[3]

¹William DuBoisDuddel (1872–2917), anglický fyzik, vynalezl a sestrojil první elektricky řízený generátor zvuku, tzv. Singing Arc, dále také elektromagnetický oscilograf, termo-galvanometr a oscilograf s pohyblivou cívkou. [4] Thaddeus Cahill (1867–1934), americký vynálezce Telharmonia, tento nástroj se však nestal komerčně úspěšným, Cahill se později věnoval vývoji světlometů. [5] Leon Theremin (1896–1993), ruský vynálezce, mezi jeho vynálezy patří kromě Thereminu také Terpsitone, Rhythmicon, Keyboard Theremin a elektronické violoncello. [6]

²Harald Bode (1909–1987), německý matematik, fyzik a filosof, v roce 1954 se přestěhoval do USA. Prvním jeho vyrobeným nástrojem bylo Melodium, v roce 1947 sestrojil Melochord, roku 1949 Polychord, v roce 1951 Polychord III a Bode Organ, v roce 1977 vytvořil Bode Vocoder a v roku 1981 Bode Phaser.

Digitální nástroje

Digitální zpracování zvuku předcházelo jeho vytváření a modifikace na analogových zařízeních. Digitální nástroje generují zvuk softwarově – zvuk je v číslicovém formátu analogicky k jeho analogovému (napětíovému) průběhu, nebo je využíván záznam již hotového zvuku, který prošel A/D převodem a je tak v číslicovém formátu. Zařízeními, využívajícími výhody číslicového formátu, jsou kromě syntezátorů také samplery a sekvencery.³

Analogově digitální nástroje

Tato skupina nástrojů ke své činnosti využívá analogových obvodů a digitálního ukládání nastavení.

Syntezátor

Elektronický hudební nástroj, pomocí něhož je možné generovat zvukový signál syntézou. Syntezátory mohou fungovat na analogovém či digitálním principu, jako monofonní, vícehlasé, případně polyfonní zařízení.

V syntezátorech obecně nacházíme tyto typy signálů:

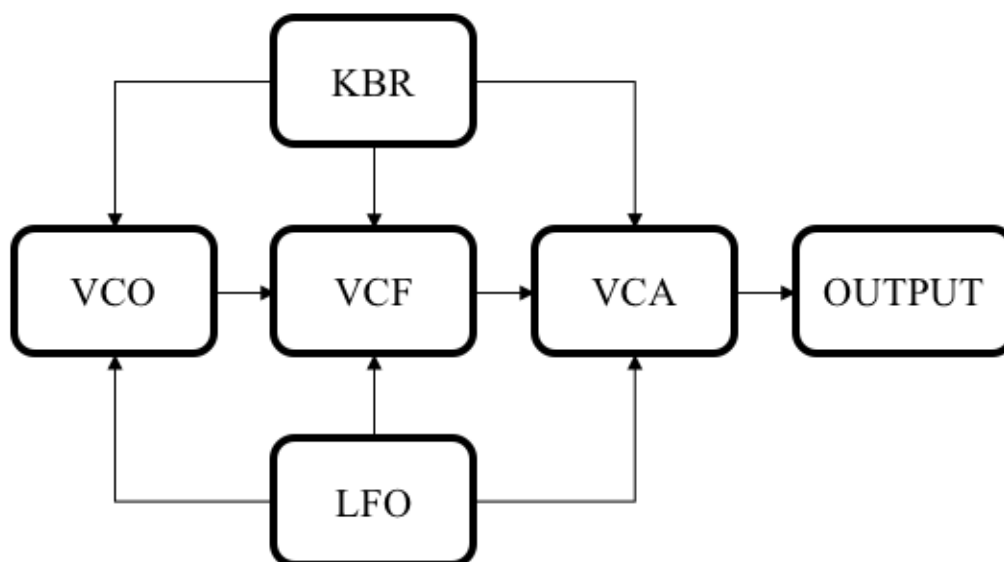
1. Řídící – ovlivňují nastavení parametrů nástroje
2. Spouštěcí – impulzní charakter, spínají jednotlivé části (obvody) nástroje
3. Akustické – výstupní zvuk vzniklý v nástroji

Nástroj je tvořen z několika typů obvodů, sloužících ke generování signálu, jeho zpracování, řízení nástroje, zajišťujících funkci nástroje jako celku. Obvody dělíme na jednotlivé typy – generační (oscilátor nebo zvukový vzorek), řídící (zesilovač a filtr), modulační (generátor obálky, LFO). Základním generačním obvodem je napětím řízený oscilátor VCO, v případě digitální podoby se označuje jako digitálně řízený oscilátor DCO, generující signál. Dále pak zde nacházíme napětíově (VCA) či digitálně (DCA) řízený zesilovač, zesilující signál vyprodukovaný oscilátorem. Součástí jsou také napětím

[7] Robert Moog (1934–2005), americký vynálezce, držitel ceny Grammy za přínos hudebnímu průmyslu, v počátcích vyráběl vlastní thereminy, v roce 1960 vytvořil Moog synthesizer. [8]

³ Mezi nejslavnější digitální nástroje patří syntezátor Yamaha DX7, představen roku 1983, který představil tehdy zcela nový typ syntézy – FM syntézu. Tento nástroj se stal populární pro jeho dostupnost a na tehdejší poměry neobvyklé možnosti generování zvuku. Dalšími ze slavných nástrojů jsou Roland D-50 využívající lineárně aritmetickou syntézu, Yamaha SY-35 tvořila zvuky pomocí vektorové syntézy.

(VCF), případně digitálně (DCF) řízené filtry, ovlivňující frekvenční spektrum generovaného signálu, patřící do skupiny řídicích obvodů. Za účelem modulování signálu je v modulačním obvodu obvykle použit nízkofrekvenční oscilátor (LFO) a generátor obálky. Hráč nástroj obsluhuje za pomoci táhel, otočných potenciometrů a klaviatury (KBR). [9]



Obr. 1.1: Schéma analogového syntezátoru

Sampler

Prvním předchůdcem samplerů byl analogový nástroj Mellotron od firmy Mellotronocis, který v reálném čase přehrával zvuk z magnetofonových pásek. Moderní digitální samplery přehrávají vzorky zvukových signálů a pomocí algoritmů dokážou měnit výšku tónu podle zahrané noty. Ve své podstatě se jedná o syntezátory, které namísto oscilátorů používají tabulku s uloženým vzorkem zvuku. Modulační a řídicí obvody jsou shodné s obvody syntezátorů. [10]

Sekvencer

Nástroj, který umožňuje zaznamenání a uložení sekvence not do paměti. Takovou sekvenci je pak možno vyvolat, upravit a přehrávat. Sekvencer bývá obvykle součástí dalšího zařízení, nejčastěji syntezátoru nebo kontroléru využívajícího protokol MIDI (Musical Instrument Digital Interface). MIDI sekvencer zaznamenává pomocí časovače informaci jako událost. Obsah této události, zahrnující také hodnotu časovače, se zaznamená do paměti sekvenceru. [11]

1.2 Tón

Zvuk vznikající pravidelným chvěním mající určitou frekvenci nazýváme tónem. Tón je popsán těmito parametry:

- Výška – je definována frekvencí tónu
- Síla – velikost amplitudy signálu
- Barva – souvisí se zastoupením harmonických frekvencí
- Délka – doba trvání v čase [12]

1.2.1 Oktáva

Tón o dané frekvenci tvoří spolu s tónem o dvojnásobné frekvenci oktavu. Oktáva je rozdělena na osm stupňů – c, d, e, f, g, a, h, c.

V evropské hudbě (temperované ladění) se dělí tóny do těchto oktáv:

- Subkontra oktava – C₂, D₂, E₂, F₂, G₂, A₂, H₂ (16,35–30,87 Hz)
- Kontra oktava – C₁, D₁, E₁, F₁, G₁, A₁, H₁ (32,70–61,74 Hz)
- Velká oktava – C, D, E, F, G, A, H (65,41–123,5 Hz)
- Malá oktava – c, d, e, f, g, a, h (130,8–246,9 Hz)
- Jednočárkovaná oktava – c¹, d¹, e¹, f¹, g¹, a¹, h¹ (261,6–493 Hz)
- Dvoučárkovaná oktava – c², d², e², f², g², a², h² (523,2–987,8 Hz)
- Tříčárkovaná oktava – c³, d³, e³, f³, g³, a³, h³ (1047–1976 Hz)
- Čtyřčárkovaná oktava – c⁴, d⁴, e⁴, f⁴, g⁴, a⁴, h⁴ (2093–3951 Hz)
- Pětíčárkovaná oktava – c⁵, d⁵, e⁵, f⁵, g⁵, a⁵, h⁵ (4186–7902 Hz) [12]

1.2.2 Stupnice a módy

Skupina tónů v rozmezí jedné oktavy seřazená podle daných, každé stupnici specifických pravidel. Jednotlivé stupnice se odlišují zejména počtem tónů v oktávě a dále také vzdáleností mezi stupni stupnice.

- Diatonické stupnice (durová, mollová, staré (církevní) stupnice, cikánská, pentatonická) mají vzdálenosti mezi jednotlivými stupni různé.
- Celotónová – vzdálenosti mezi jednotlivými stupni jsou celé tóny, má šest celotónových stupňů.

- Chromatická – vzdálenosti mezi jednotlivými stupni jsou půltóny, chromatická stupnice se skládá z 12 půltónů. Chromatická stupnice vznikne doplněním diatonické řady odvozenými tóny takovým způsobem, aby bylo obsáhnuto všech dvanáct stupňů v oktávě. [12]

Stupnici lze vytvořit od kteréhokoliv tónu, tento tón se pak nazývá základním tónem stupnice, podle základního tónu pak stupnice nese i název, například stupnice d moll začíná tónem d, podle počtu tónů v oktávě a vzdálenosti mezi nimi se pak stupnice nazývá mollovou, případně durovou. Dále rozlišujeme stupnici a tóninu. Obě uskupení mají společný základní tón, u tóniny se nazývá tónika, a stejně jako u stupnic se podle tohoto tónu tónina jmenuje.

- Durové stupnice mají osm stupňů, poslední stupeň je však opakováním prvního stupně posunutý o oktávu, durové stupnice tak obsahují sedm různých tónů, řadíme je tedy do sedmistupňových stupnic. Vzdálenosti mezi jednotlivými stupni jsou buď celotónové (1), nebo půltónové (1/2), u durové stupnice v tomto pořadí:

1 1 1/2 1 1 1 1/2

- Mollové stupnice se dále dělí na přirozené, harmonické a melodické. Přirozená stupnice má stejně jako durová osm stupňů, sedm různých tónů, s následujícími vzdálenostmi:

1 1/2 1 1 1/2 1 1

Harmonické a melodické stupnice vznikly za účelem připodobnění se stejnojmenným stupnicím durovým.

Uměle konstruované stupnice (módy) byly vytvořeny pro splnění specifických požadavků skladatelů, nástrojů, kultur. Příkladem je dílo francouzského skladatele Oliviera Messiaena, publikováno v knize *The Technique of my Musical Language*, takzvané módy limitované transpozice, které jsou specifické symetrií a opakujícími se intervaly. [13]

1.2.3 Intervaly

Hudební interval popisuje výškovou vzdálenost mezi dvěma tóny. V rámci oktávy se rozlišuje celkem osm intervalů, prvním z řady je prima, sekunda, tercie, kvarta, kvinta, sexta, septima, oktáva. Aby bylo možné popsat všech dvanáct intervalů v chromatické stupnici, používáme označení malá, velká a čistá. [12]

1.2.4 Ladění

Různá ladění se od sebe liší rozdílnými poměry frekvencí mezi jednotlivými intervaly. Referenční tón pro ladění je a^1 o frekvenci 440 Hz.

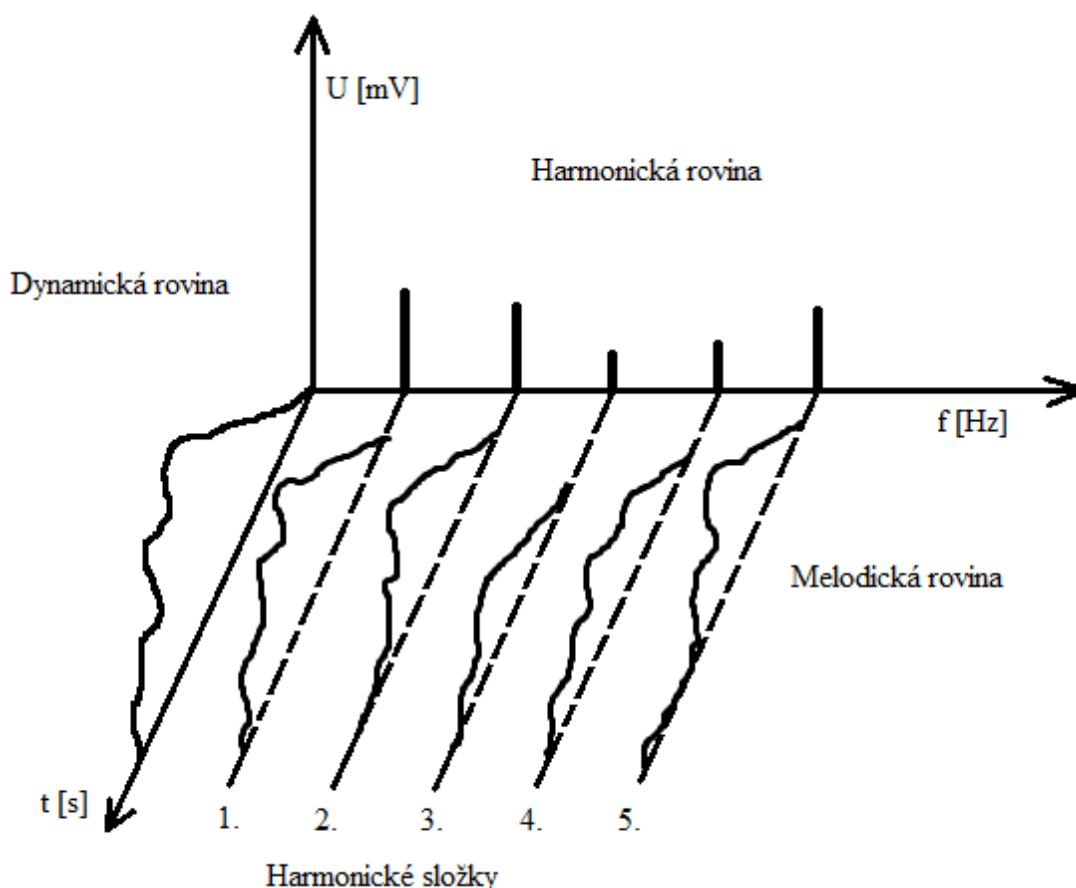
- Pythagorejské ladění – ve své podstatě se jedná o řadu kvint, tón cis má vyšší frekvenci než tón dis.
- Přírodní ladění – vzhledem k nevhodnosti Pythagorejského ladění se vymyslelo ladění přírodní, rozdíl mezi terciemi v přírodním ladění a terciemi v Pythagorejském ladění je 22 centů, tato skutečnost se nazývá didymickým kómatem.
- Didymické ladění – ladění, v němž se užívá přírodní velká tercie a přírodní malá tercie, tón des je vyšší než tón cis.
- Rovnoměrně temperované dvanáctistupňové ladění – navrženo roku 1691 Andreasem Werckmeisterem, nejběžnější ladění, rozděluje oktávu na dvanáct stejných dílků (půltónů), poměr frekvencí mezi dvěma tóny, které jsou od sebe vzdáleny o půltón lze vypočítat takto:

$$x = \sqrt[12]{2} = 1,05946309 \quad (1.1)$$

Aby bylo možné popsat drobné odchylky ladění, existuje takzvané Ellisovo dělení, které dělí oktávu na 1200 centů, jeden půltón v temperovaném ladění má hodnotu 100 centů. Kvinty rovnoměrně temperovaného ladění jsou o dva centy nižší než v případě přírodního ladění, tóny cis a des mají stejnou výšku. Toto ladění vycházelo z potřeby barokní hudby, která vyžadovala širší škálu možností.
[12] [14]

1.3 Hudební signál

Jako hudební signál označujeme zvuk, který je vytvořen periodickým kmitáním. Na hudební signál lze nahlížet dvěma způsoby – staticky anebo dynamicky. Statickým pojetím nahlížíme na signál pouze pomocí dvojrozměrného prostoru harmonické roviny, která je vymezena frekvencí a amplitudou hudebního signálu. Aby bylo možné signál analyzovat, je nezbytné jej zobrazit v trojrozměrném prostoru, vymezeném třemi rovinami – harmonickou, dynamickou a melodickou, jedná se pak o dynamické pojetí hudebního signálu.



Obr. 1.2: Dynamický náhled na signál [14]

V dynamické rovině je znázorněn průběh zvukového signálu v čase. Podle rychlosti a velikosti tvarových změn můžeme dále posoudit a rozlišit jeho tónový, případně hlukový charakter. Pokud průběh jeví známky pravidelnosti, jedná se o tónový (hudební) charakter zvuku, nahodilé změny jsou typické převážně pro hluky či šum.

Postupem, kterým získáme přehled o zvukovém signálu, je změna měřítka časové osy tak, abychom dosáhli zobrazení obrysu zvuku, čímž dojde k zobrazení časové obálky. Výsledkem tohoto procesu je graf reprezentující základní časové vlastnosti zvuku a jeho perkusní (vykazují pouze fázi náběhu a poklesu na nulu) / neperkusní (zřetelně rozpoznatelné jednotlivé fáze ADSR – náběhu, poklesu na ustálenou hodnotu a poklesu na nulu) charakter. Časovou obálku můžeme popsat jako modulační funkci $A(t)$, měnící maximální amplitudu signálu.

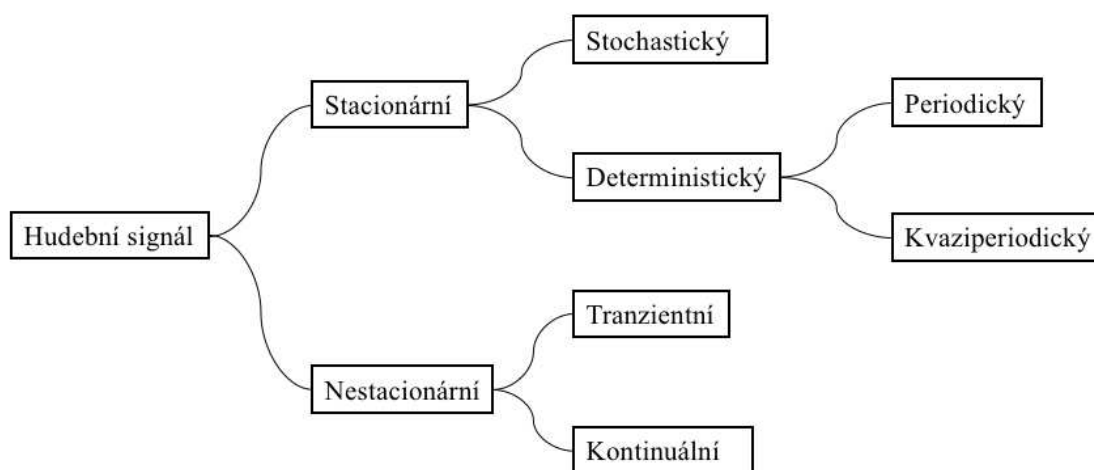
$$f(t) = A(t) \cdot g(t), \quad (1.2)$$

kde $A(t)$ je obálka reálného signálu, $g(t)$ je nemodulovaný signál, například $\sin(\omega t + \varphi)$. [14]

Melodická rovina je oblast, ve které hraje hlavní roli závislost frekvence komplexního signálu na čase a také závislost dílčích frekvenčních složek zkoumaného signálu na čase. V melodické rovině se také objevují neharmonicity – odchylky od harmonických tónů (celočíslných násobků jednotlivých složek tónu).

Poslední rovinou umožňující klasifikaci hudebního signálu jest rovina harmonická, popisující frekvenční strukturu signálu. Grafické zobrazení harmonické roviny označujeme jako frekvenční spektrum.

Signály můžeme dělit podle jejich závislosti na čase na stacionární a nestacionární, dále ještě podle toho, zda signál lze v každém okamžiku popsat definičním vztahem – signály deterministické, případně signály nahodilé – stochastické, které nelze jednoznačně obsáhnout matematickým předpisem.



Obr. 1.3: Dělení signálů [14]

Hudební signál produkovaný nástrojem se sestává z komplexu několika typů signálů uvedených výše v různém vzájemném poměru.

Periodické signály disponují diskrétním harmonickým frekvenčním spektrem, jehož vyšší harmonické složky jsou tvořeny pouze z celočíselných násobků základní složky. Periodické signály můžeme dělit na harmonické – popisujeme je funkcí sinus, cosinus – v jejichž frekvenčním spektru je pouze jedna složka – základní frekvence, a na signály komplexní, v jejichž spektru jsou mimo základní spektrální složky další, vyšší harmonické složky s hodnotami celistvých násobků základní frekvence.

Signály kvaziperiodické mohou nad to ve svém spektru obsahovat i vyšší složky v různém poměru se složkou základní.

Spektrum stochastických signálů je spojité, není tak, na rozdíl od periodických, či kvaziperiodických signálů, tvořeno diskrétními složkami. [14]

1.4 Generování zvuku v elektronických nástrojích

Procesy vedoucí ke vzniku zvuku způsobem typickým pro danou metodu.

1.4.1 Aditivní syntéza

Aditivní syntézou se nazývá způsob, kdy dochází ke sčítání jednotlivých harmonických složek signálů generovaných oscilátory. Pokud sčítáme harmonické složky o konstantních amplitudách, frekvenci a fázi, hovoříme o takzvané statické podobě (fourierovské) syntézy, která je využívána například v hammondových varhanách.

Statická syntéza je popsána následující funkcí:

$$f(t) = \sum_{k=1}^N A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (1.3)$$

kde A_k je amplituda signálu, ω_k frekvence, φ_k je fáze k-té složky signálu při množství N složek. [14]

Dochází-li ke vzájemně nezávislým procesům řízení amplitudy, fáze, frekvence signálů, jedná se o dynamickou syntézu.

Dynamickou syntézu je možno matematicky popsat:

$$f(t) = \sum_{k=1}^N A_k(t) \sin[(\omega_k(t) \cdot t + \varphi_k(t))], \quad (1.4)$$

kde figurují $A_k(t)$, $\omega_k(t)$, $\varphi_k(t)$ jako závislosti amplitudy, frekvence a fáze k-té složky signálu na čase. [14]

1.4.2 Subtraktivní syntéza

Při subtraktivní syntéze dochází k řízenému ovlivňování signálu, který je bohatý na harmonické složky. Za pomoci filtrů (dolní propust, pásmová propust, horní propust) se omezuje frekvenční spektrum signálu různého průběhu a frekvenci. [2]

1.4.3 Lineárně aritmetická syntéza

Lineárně aritmetická syntéza je založena na kombinaci subtraktivní syntézy s PCM vzorky. Takový vzorek je tvořen krátkým intervalem, kdy dochází k náběhové fázi zvuku (tzv. attack). Do série zvuků je dále přidán vzorek jedné periody libovolného průběhu, který se opakuje ve smyčce. Zvuk tvořen lineárně aritmetickou syntézou se skládá ze tří částí:

1. Náběhová část – vzorek transientního zvuku
2. Střední část zvuku – zvuk vzniklý subtraktivní syntézou
3. Zvuk vzniklý smyčkou mnoha vzorků

1.4.4 Modulační metody syntézy

- Frekvenční modulace – tento druh syntézy spočívá v modulaci jednoho signálu (anglicky carrier) jiným, modulačním signálem (anglicky modulator). Důsledkem frekvenční modulace je vznik postranních pásem, jejichž frekvence jsou rovny součtům a rozdílům frekvence nosiče a modulátoru. Příkladem tohoto typu modulace je efekt vibráto. Výraz popisující modulaci vypadá následovně:

$$f(t) = c_0 \sin(\omega_0 t + \beta \sin \Omega t), \quad (1.5)$$

kde se $\beta = \frac{\Delta \omega}{\Omega}$ nazývá index modulace, $\Delta \omega$ je modulační zdvih. [14] [16] [17]

- Parametrická zpětnovazební modulace – vstup pro modulační signál oscilátoru je propojen s výstupem modulovaného oscilátoru. [14]
- Kruhová modulace – výstupem systému realizujícího kruhovou modulaci jsou dva signály, jeden z nich má frekvenci rovnou součtu vstupních signálů, druhý signál má frekvenci rovnou rozdílu frekvencí vstupních signálů. [16]
- Amplitudová modulace – při amplitudové modulaci je ovlivňována amplituda signálu jiným signálem, jehož zdrojem LFO. V tomto případě nedochází ke změně frekvence, vzniku dalších harmonických, ani ke změně fáze. Nejznámějším příkladem amplitudové modulace je efekt tremolo. Výsledný signál je obecně popsán touto funkcí:

$$f(t) = C_0 (1 + m \cdot A(t)) G(t), \quad (1.6)$$

kde je $A(t)$ modulovaný signál, například $\sin \Omega t$, $G(t)$ je modulační signál, například $\sin(\omega_0 + \varphi_0)$, m je hloubka modulace nabývající hodnot v rozmezí 0–1. [14] [16] [17]

- PWM – pulsně šířková modulace, dochází ke změně střídy obdélníkového průběhu signálu. [17]

1.4.5 Tvarová metody syntézy

- Nelineární tvarování – proces, při kterém prochází vstupní signál nelineárním obvodem a dochází k jeho zkreslení, vzniku nových harmonických složek. Čím vyšší je amplituda signálu, tím větší je také míra zkreslení. [18]
- Přímé zadávání průběhu – jedná se o digitální metodu, signál je přímo zadáván (alespoň jedna jeho perioda) jako aproximace tvaru – aproximační metoda, případně jako křivka sestavená jednotlivých dílů – segmentační metoda. [14]
- Metoda fázového zkreslení – tato segmentační metoda je realizována řízeným nelineárním nárůstem fázového úhlu.
- Granulární syntéza – patří také mezi segmentační metody, její podstatou je rozdělení zvuku na krátké úseky, takzvané granule, a jejich opětovné zkompletování nezávislé na původním pořadí, amplitudě, délce. Jednotlivé granule mají různou délku, v rozmezí 10–100 ms. [18]

1.4.6 Vektorová syntéza

Signál na výstupu je vytvořen poměrem nejméně dvou, obvykle čtyř zdrojů zvuků. Prvním nástrojem využívajícím tento druh syntézy je syntezátor Prophet VS. Používá čtyři zvuky generované oscilátory, nástroj se ovládá pomocí joysticku umístěného ve čtverci. Pokud je joystick ve středu čtverce, zvuk na výstupu nástroje je kombinací všech čtyř průběhů, přiblížením joysticku k jednomu z rohů čtverce se mění poměr zvuků ve prospěch zvuku typického pro tento roh čtverce. [19]

1.4.7 Sampling

Při procesu samplování dochází nejprve k převodu zachyceného vzorku signálu z analogového do číslicového formátu a následně pak k jeho modulaci (přeladování, změna délky, apod.). Zvukový vzorek je uložen do paměti nástroje, který samplování umožňuje (zvaný sampler), ze které je možné vzorek vyvolat, zařadit jej do série zvuků a dále ho modulovat. U této metody se s oblibou využívá takzvaného loopování, česky smyčkování, při kterém se omezeně dlouhý zvukový interval přehrává ve smyčce a může pak tvořit například linku bicích nástrojů ve skladbě. [18]

1.5 Použití oscilátoru

Vznik zvuku obecně souvisí s kmitavým pohybem hmoty. Kmitající část nástroje generující periodický signál (zvuk) se nazývá oscilátor. U mechanických nástrojů takovým oscilátorem může být struna, plátek, blána, apod., v případě analogových

elektronických nástrojů je oscilátor vytvořen pomocí LC obvodů, které kmitají vybíjením a nabíjením kondenzátoru přes cívku a produkují tak různé druhy signálů. V digitálních elektronických zařízeních se nachází virtuální oscilátor vytvořen programově pomocí různých metod, v tomto nástroji pomocí přímé číslicové syntézy.

1.5.1 Oscilátor jako řídicí prvek

LFO – nízkofrekvenční oscilátor neslouží ke generování zvuků o dané frekvenci, nýbrž k modulaci různých parametrů prvků v obvodu. LFO tak můžeme ovlivňovat například amplitudu (efekt tremolo, vibráto), střidu, fázi, atd.

1.5.2 Oscilátor jako generátor zvuku

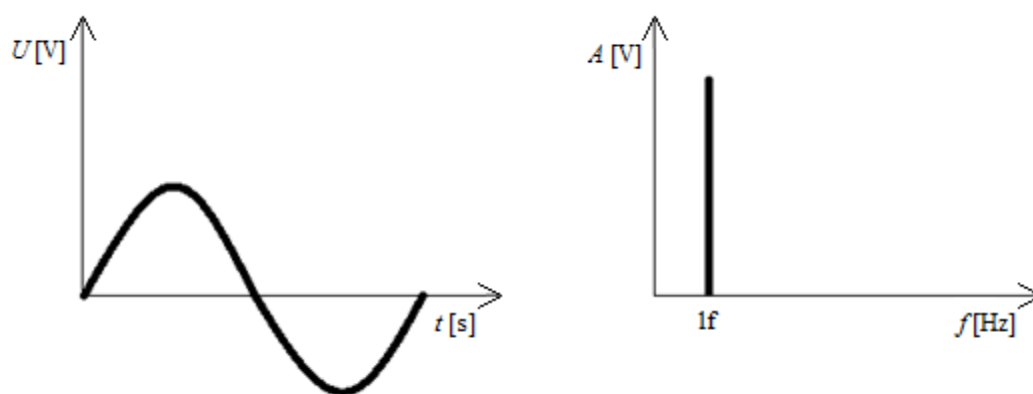
Kmity elektronických nástrojů jsou analogií kmitů akustických nástrojů. Analogové oscilátory, jejichž frekvence je řízena napětím se zkráceně nazývají VCO, digitální oscilátor je takový, kterého frekvence je řízena informací v číslicové podobě, nazývá se zkráceně DCO. Oscilátor produkuje některý z těchto typů průběhu – sinusový, obdélníkový, trojúhelníkový nebo pilový. Signál vygenerovaný oscilátorem je dále upravován průchodem obvodů nástroje (změna fáze, průchod obvodem s nelineární charakteristikou, apod.).

1.6 Základní průběhy signálů

Signály generované oscilátory se v případě mechanických oscilátorů pouze přibližují nebo jsou kombinací ideálních průběhů namodelovaných na obrázcích níže. Signál vzniklý elektrickým oscilátorem však tyto průběhy může přesně napodobit, v analogových syntezátorech je pro každý takový průběh samostatný oscilátor, který generuje širokospektrální signál, jehož filtrací poté vznikají výsledné průběhy, jedná se tak o průběhy vzniklé subtraktivní syntézou. V digitálních nástrojích se setkáváme s virtuálními oscilátory, těch lze naprogramovat libovolné množství (v závislosti na parametrech a možnostech nástroje).

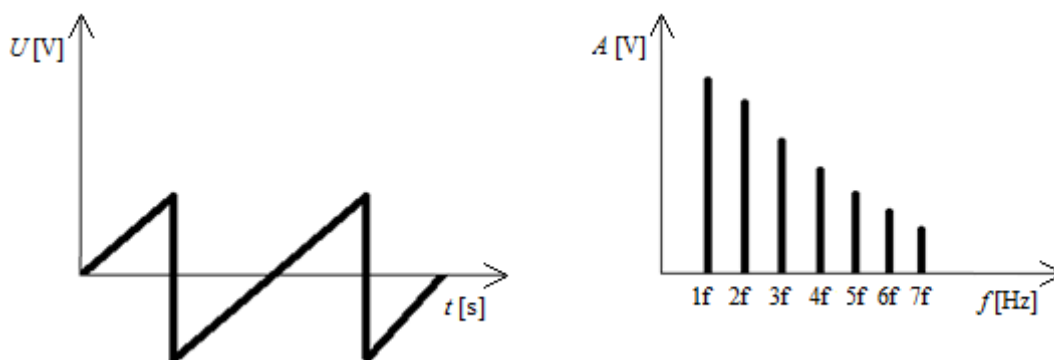
Na obrázcích uvedených níže si lze prohlédnout různé druhy generovaných signálů a znázornění jejich frekvenčního spektra. [3]

Sinusový průběh signálu obsahuje pouze jednu harmonickou složku.



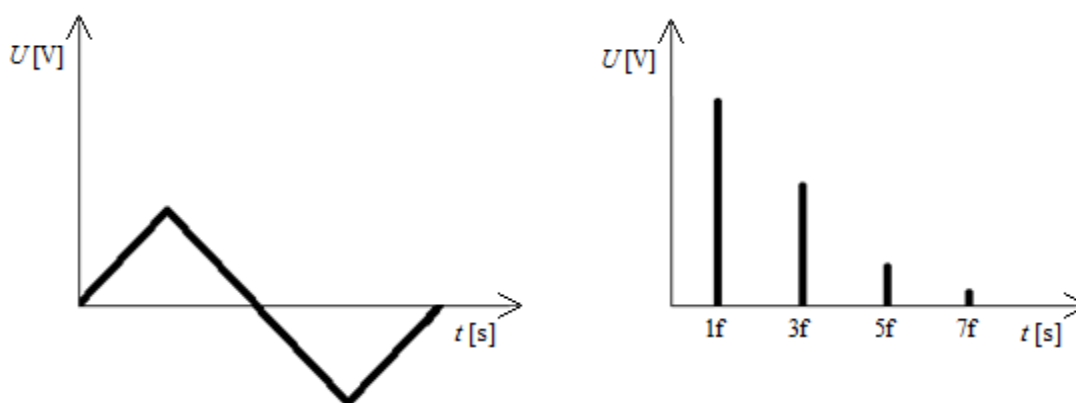
Obr. 1.4: Sinusový signál

Pilovitý průběh signálu obsahuje jak sudé, tak liché harmonické složky.



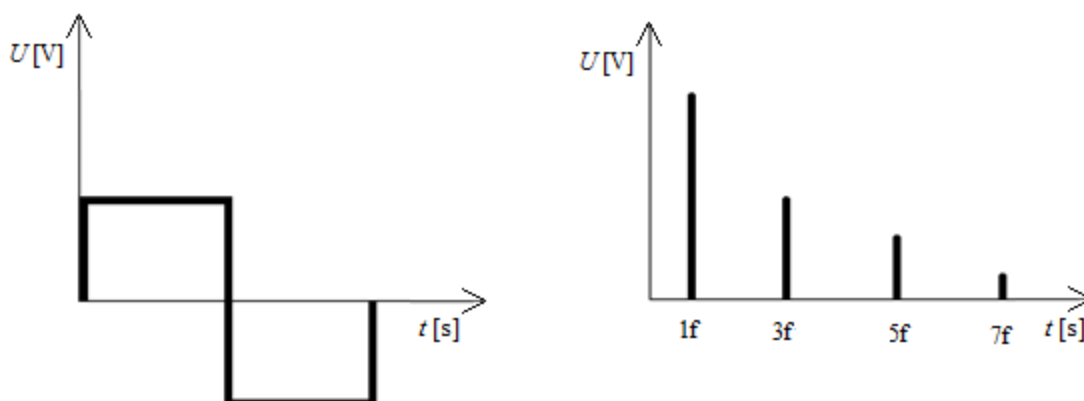
Obr. 1.5: Pilovitý průběh signálu

Trojúhelníkový signál obsahuje pouze liché harmonické složky.



Obr. 1.6: Trojúhelníkový průběh signálu

Obdélníkový signál obsahuje harmonické v závislosti na jeho střídě, na obrázku je uveden signál se střídou 50 %, signál tak obsahuje pouze liché harmonické složky.



Obr. 1.7: Obdélníkový průběh signálu

1.7 Filtry

K ovlivnění frekvenčního spektra signálu generovaného oscilátory a úpravě tvaru signálu se využívají filtry. Útlum frekvencí, které jsou odfiltrovány, záleží na strmosti filtru související s řádem použitého filtru. Mezní frekvenci f_0 , která je určena vztahem (5), lze ovlivnit hodnotami použitých součástek – velikostí odporu R rezistoru, velikostí kapacity kondenzátoru C :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (1.7)$$

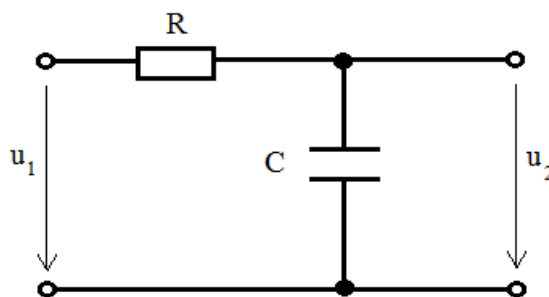
udává frekvenci, při které dojde k poklesu přenosu o 3 dB.

1.7.1 Pasivní dolní propust prvního řádu

Dolní propust je tvořena RC článkem. Zapojením filtru do obvodu dojde k omezení frekvencí nad mezním kmitočtem f_0 , takového filtru. Strmost filtru prvního řádu můžeme určit pomocí vztahu pro výpočet modulu přenosové funkce $Z(\omega)$, který má následující podobu:

$$Z(\omega) = 20 \log(1/\omega RC) \quad (1.8)$$

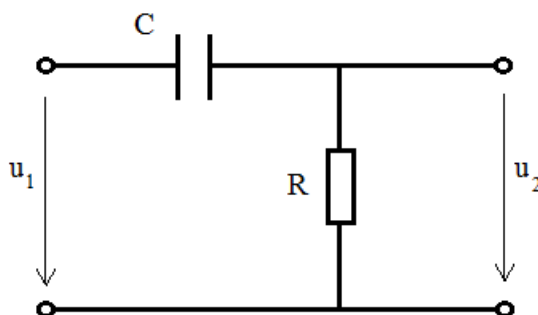
Z tohoto vzorce plyne hodnotu strmosti filtru prvního řádu, která je 20 dB na dekádu, nebo, v hudebním pojetí užívanější přepočten, 6 dB na oktávu.



Obr. 1.8: Dolní propust

1.7.2 Pasivní horní propust prvního řádu

Horní propust je stejně jako dolní propust tvořena RC členem, který opačným zapojením, než jaké je u dolní propusti, propouští frekvence nad mezním kmitočtem f_0 .



Obr. 1.9: Horní propust

Kombinací filtrů typu dolní a horní propust vznikne takzvaná pásmová propust či pásmová zadrž, která propouští/zadržuje frekvence v rozmezí intervalu stanoveném mezním kmitočtem každého z filtrů. Sestavu různých filtrů označujeme jako ekvalizér. [20]

1.8 Zapojení operačního zesilovače

1.8.1 Operační zesilovač

- Součástka využívaná širokým množstvím aplikací pro svou univerzálnost a efektivitu. K jeho hojnému rozšíření přispělo zjištění, že aplikací záporné zpětné vazby na stejnosměrný zesilovač je možné získat obvod s říditelným zesílením závislejícím na parametrech zpětné vazby.

Z důvodu zjednodušení se pro popis vlastností operačního zesilovače využívá jeho ideální model, který má nekonečné zesílení, nekonečnou vstupní impedanci, nulovou výstupní impedanci. [21]

Vzorec pro výpočet napět'ového zesílení je definován jako:

Invertující zapojení:

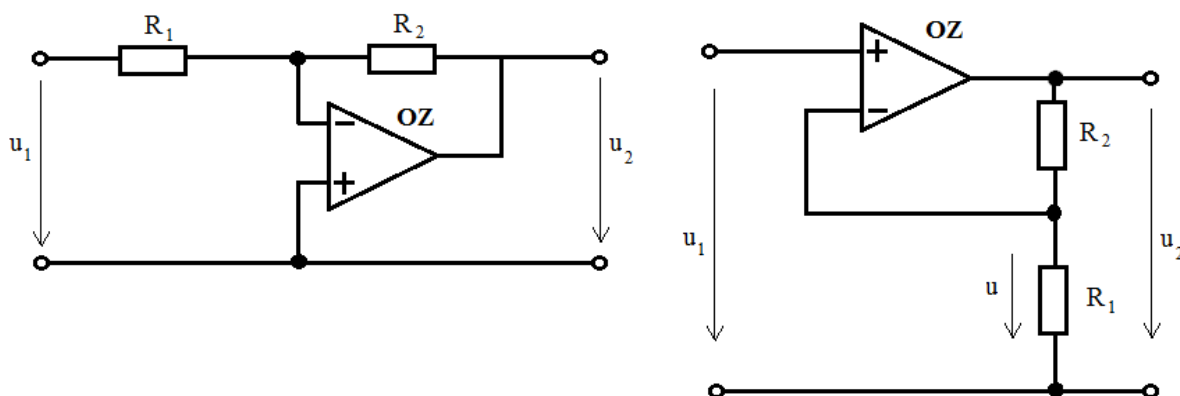
$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = -\frac{R_2}{R_1}, \quad (1.9)$$

neinvertující zapojení

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}, \quad (1.10)$$

kde A_u je napět'ové zesílení, R_1 R_2 jsou hodnoty rezistorů zapojených v obvodu.

[20]



Obr. 1.10: Základní zapojení OZ (invertující, neinvertující)

1.8.2 Operační zesilovač jako komparátor

- Komparátor – obvod, jehož úkolem je srovnávání signálu na vstupu s referenčním signálem a z toho plynoucí změna stavu. [20]

1.8.3 Operační zesilovač jako napět'ový sledovač

- Buffer – napět'ový sledovač realizovaný operačním zesilovačem. Napět'ový sledovač slouží k impedančnímu oddělení. Zesilovač v tomto zapojení neposkytuje žádné zesílení vstupního signálu, jeho napět'ové zesílení A_u je rovno jedné. [21]

1.9 Piezoelektrický měnič

Součástka, na jejichž svorkách se vlivem mechanického stlačování krystalu objevuje elektrický náboj q úměrný namáhání krystalu, který je tímto krystalem generován. Pro

tento náboj platí rovnice $q = C_0 u$, kde je C_0 kapacita krystalu mezi kovovými polepy, pomocí kterých je odváděn náboj. Pro napětí objevující se na svorkách měniče platí:

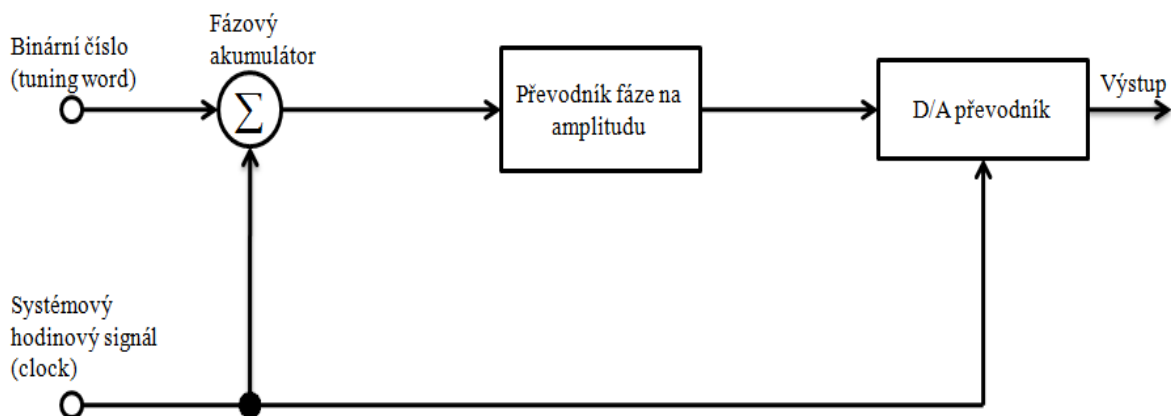
$$u = \frac{\vartheta_P S_P}{C_0 S_S} F, \quad (1.11)$$

kde je ϑ_P piezoelektrický činitel, C_0 je klidová kapacita krystalu, S_P je plocha polepů pro odvádění náboje, S_S je plocha síly působící na krystal. [22]

1.10 Generování zvuku pomocí přímé číslicové syntézy (DDS)

Přímá číslicová syntéza je způsob, jakým lze generovat signál o libovolném průběhu (sinus, obdélník, trojúhelník, pila) v softwarovém prostředí, který je posléze pomocí D/A převodníku převeden z číslicového formátu na analogový. Tento způsob byl použit pro generování zvukového signálu v nástroji,

Frekvence signálu závisí na dvou proměnných – na referenční hodinové frekvenci a na binárním čísle zapsaném ve frekvenčním registru.



Obr. 1.11: Blokový diagram DDS

Binární číslo zapsané ve frekvenčním registru je hlavním vstupem oddílu fázový akumulátor. Jednotlivé fáze průběhu vlny jsou zapsány v tabulce, fázový akumulátor slouží k vypočtení fáze zadané pomocí binárního čísla a výsledkem je číslicová hodnota amplitudy odpovídající požadované fázi. [23]

1.11 Mikrokontrolér

Jednočipový mikropočítač, kterého je možno využít k nepřebernému množství aplikací, jakými jsou například řízení, ovládání a monitorování procesů, zařízení.

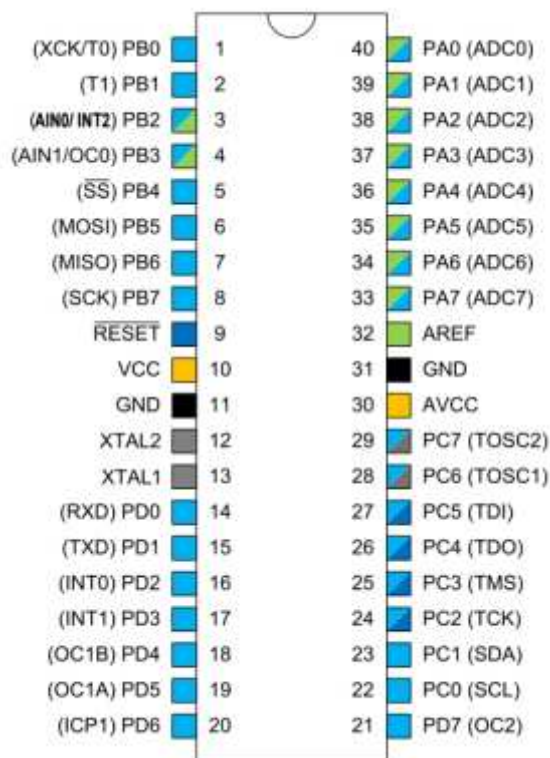
Mikrokontrolér se obvykle sestává z těchto částí:

- CPU – centrální procesorová jednotka, která řídí všechny části mikrokontroléru.

- RAM – operační paměť.
- ROM – paměť sloužící k zapsání programu řídicího mikrokontrolér.
- I/O porty – port, který lze využít jako vstup nebo výstup mikrokontroléru.
- Oscilátor – slouží pro generování hodinového signálu.
- Časovače/čítače – používané pro snímání pulsů externích zařízení, spouštění časově kritických úloh, apod.
- Přerušení – slouží k přerušení aktuálního programu a okamžitému provedení požadované operace. Rozlišujeme interní přerušení (časovače/čítače, A/D převodník, sériová linka, ...) a externí přerušení.
- A/D, D/A převodníky – A/D převodníky slouží k převedení analogového signálu na jeho číslicový formát, D/A převodníky převádějí číslicový signál zpět na analogový.
- Sériové porty, přes které komunikuje mikrokontrolér s připojenými externími zařízeními, například SPI, UART, I²C. [24]

1.11.1 Mikrokontrolér ATMEGA32A

Zde, v tomto konkrétním případě, slouží 8-bitový CMOS mikrokontrolér založený na RISC architektuře jako hlavní řídicí jednotka nástroje. Mikrokontrolér je programovatelný s flash pamětí 32 kB interní SRAM pamětí 2 kB a 1024 byte EEPROM pamětí. Mikrokontrolér disponuje celkem 40 piny. Piny jsou rozčleněny do čtyř podskupin – A, B, C, D, z nichž má každá skupina rozdílné vlastnosti. Každému z pinů lze přidělit konkrétní funkci na základě manuálu k zařízení. [25]



Obr. 1.12: ATmega 32A

1.12 Číslicově analogový převodník

Jeho funkcí je reprezentace číslicové posloupnosti do analogové podoby jedné z veličin napětí/proud. Převod číslicové posloupnosti na analogovou veličinu je inverzním procesem ke vzorkování signálu, při převodu je nutno dodržet tzv. Shannon-Kotělnikovův nebo Nyquistův teorém, který udává, jakou vzorkovací frekvence je nezbytně nutné použít, aby nedošlo k jevu zvanému aliasing – překrytí spekter. Vzorkovací kmitočet ω_v musí být nejméně dvakrát větší, než je nejvyšší kmitočet vzorkovaného signálu ω_{MAX} .

$$\omega_v > 2\omega_{MAX}$$

Převod číslicového signálu D na napětí u_A nebo proud i_A provádí D/A převodník podle níže uvedeného vztahu:

$$u_A = U \cdot D, i_A = I \cdot D, \quad (1.12)$$

ve kterém U definuje napěťový rozsah a I definuje proudový rozsah nebo kvantizační krok (qU , qI) převodníku, odvozené od referenčního napětí případně proudu. Pokud je $U = U_R$, hodnota binárního číslicového signálu splňující podmínku $D \leq 1$ je popsána tímto vztahem:

$$D = \sum_{n=1}^N a_n 2^{-n}, \quad (1.13)$$

kde je N počet bitů, a_n jsou jednotlivé bity (bit a_1 odpovídá MSB bitu) číslicového binárního signálu. V případě, že je $U = qU$, je číslicové vyjádření binárního kódového slova z množiny celých čísel (a_1 v tomto případě odpovídá LSB bitu): [20]

$$D = \sum_{n=1}^N a_n 2^{n-1}. \quad (1.14)$$

Důležitým parametrem D/A převodníku je rozlišovací schopnost/kvantizační krok Q , který udává, jakého množství hladin může analogový signál na výstupu D/A převodníku nabýt. Tento parametr přímo souvisí s počtem bitů vstupního datového slova;

$$Q = \frac{1}{2^{n-1}}, \quad (1.15)$$

kde n je počet bitů vstupního slova. [26]

1.12.1 D/A převodník MCP 4822 DA

Číslicově analogový dvoukanálový dvanáctibitový převodník použitý v tomto nástroji, který komunikuje skrze SPI sběrnici jako SLAVE. Slouží zde k převodu zvukového signálu ze dvou oscilátorů naprogramovaných a uložených do paměti mikrokontroléru.

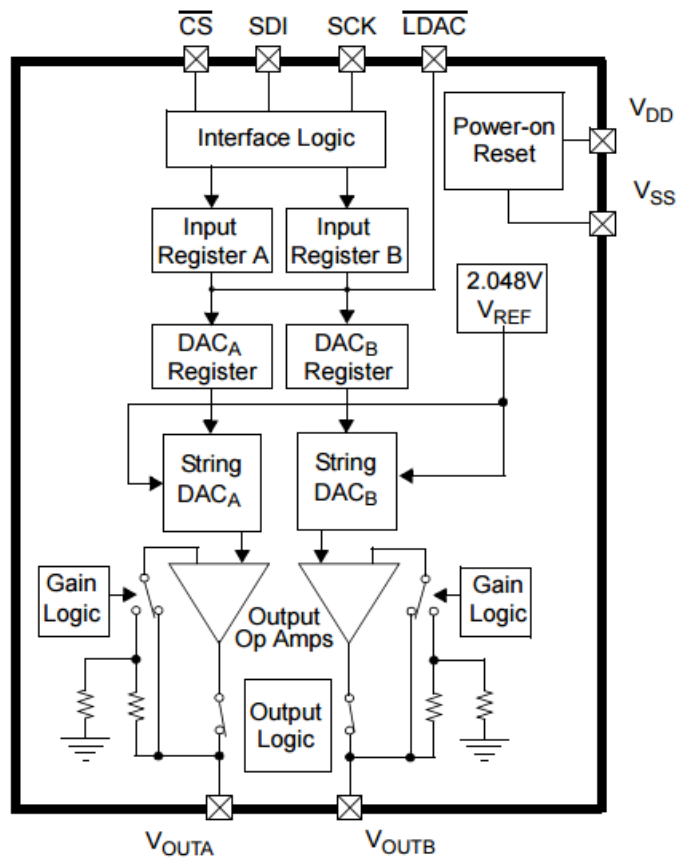
Označení vstupů D/A převodníku

Označení vstupů převodníku kompatibilní se značením SPI sběrnice:

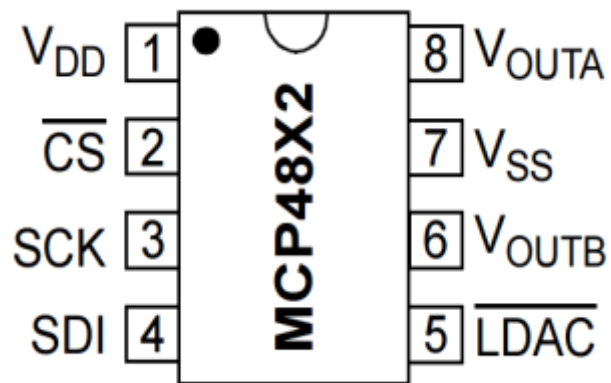
1. SCK = SCK
2. CS = SS
3. SDI = MOSI

Vstup LDAC

Tento vstup zajišťuje synchronizaci a obnovování obou výstupů D/A převodníku. Nejprve jsou odeslána data, která jsou zapsána na výstup poté, co vstup LDAC obdrží synchronizační impuls.



Obr. 1.13: Blokové schéma D/A převodníku [27]



Obr. 1.14: Název pinů D/A převodníku [27]

1.12.2 SPI sběrnice

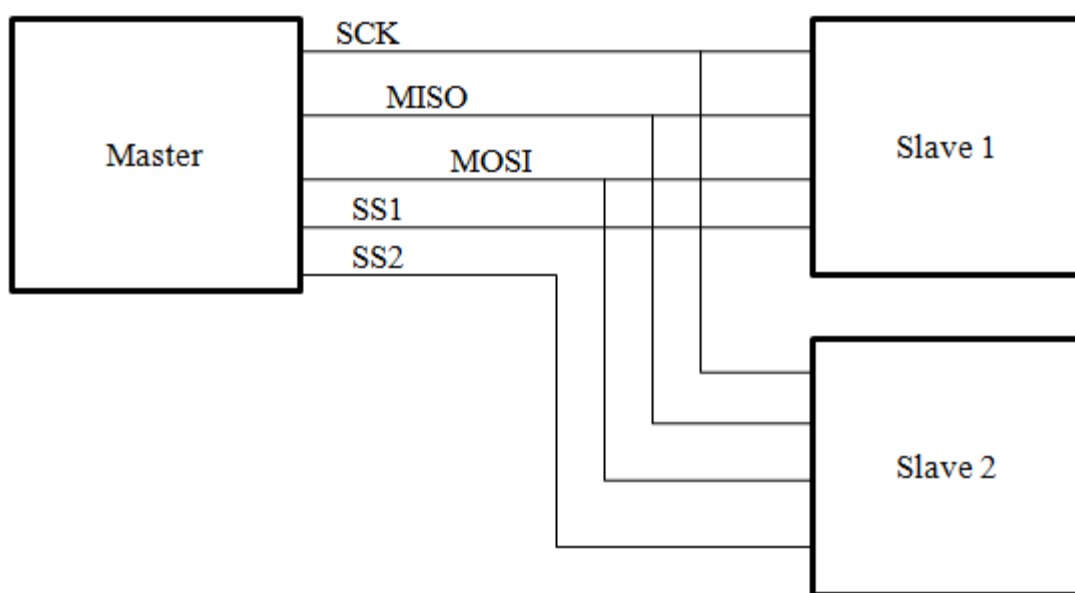
Je tvořena třemi signály:

1. MOSI
2. MISO
3. SCK

Uvedené signály jsou dále doplněny o signál SS sloužící k řízení.

Hodinový signál SCK je generován oddílem "master" a slouží k synchronizaci oddílů "master" a "slave", tedy mikrokontroléru (master) a D/A převodníku (slave). Tato synchronizace je nezbytná k zajištění správného navzorkování signálu s datovou informací.

V případě, že dochází k datovému toku mezi jednotkami master a slave, přičemž data vysílá blok master, komunikují po lince MOSI – Master Out, Slave In. V opačném případě, kdy reaguje jednotka slave, dochází ke komunikaci přes kanál MISO – Master In, Slave Out. Každá z jednotek slave obsahuje kanál SS, který slouží k aktivování dané jednotky pro komunikaci s oddílem Master. [28]



Obr. 1.15: Blokový diagram M/S

Frekvence hodinového signálu SCK je prescalerem (děličem frekvence) mikrokontroléru nastavena na 8 MHz, původní frekvence oscilátoru (16 MHz) je tedy prescalerem podělena dvěma.

1.13 Displej

Pro komunikaci uživatele s nástrojem je nezbytnou součástí také alfanumerický displej. Existuje mnoho technologií zobrazování, jako příklad uvedu CRT (Cathody Ray Tube – katodový monitor), LCD (Liquid crystal displej – tedy displej z tekutých krystalů), TFT (Thin Film Transistors), LED (Light Emitting Diode), OLED (Organic Light Emitting Diode). Hlavním článkem displeje fungujícím na principech technologie OLED, jakožto technologii displeje použitého v nástroji, je tzv. OLED emitor – organický materiál

založený na uhlíku, který svítí, je-li do něj přiveden elektrický proud. Struktura displeje se skládá z vyzařující vrstvy umístěné mezi dvěma dalšími vrstvami. První z nich je katoda, která uvolňuje elektrony, druhou část tvoří anoda, která elektrony odebírá.

Displej je řízen mikrokontrolérem, rozlišujeme dva typy komunikace mezi displejem a mikrokontrolérem – sériovou (USART), datové bity se mezi vysílajícím a přijímacím zařízením přenášejí za sebou pomocí jednoho vodiče, druhou možností je paralelní komunikace, při které na rozdíl od komunikace sériové dochází v jednom okamžiku k přenosu několika bitů zároveň.

Paralelní rozhraní využívá ke komunikaci tři typy signálů – Enable, Register Select, Read/Write. Signál Enable oznamuje displeji, že jsou data nebo instrukce uložené v registru připravené k zobrazení. Signál Register Select slouží k signalizaci v případě, že je do displeje posílán příkaz nebo data. Pomocí signálu Read/Write displej rozpoznává, zda data zapisovat do registru nebo je z něho číst.

Existují různé rozhraní této paralelní komunikace, nejběžnější z nich je 8-bitová, dále pak se můžeme setkat s 4-bitovou, 16-bitovou a dalšími jejich modifikacemi. [29] [30]

2 Praktická část

Výstupem praktické části této bakalářské práce je funkční nástroj, na jehož výstupu je signál, který splňuje představy a požadavky návrhu experimentálního nástroje – signál vzniklý sloučením dvou průběhů vycházejících ze dvoukanálového D/A převodníku, reflektující pokyny zadané uživatelem, kterými jsou:

1. Výška tónu (pro oba oscilátory jeden společný tón)
2. Oktáva
3. Tvar průběhu signálu
4. Míra rozladění oscilátoru (druhého vůči prvnímu)
5. Hlasitost obou oscilátorů
6. Vzájemný fázový posun
7. Tempo přehrávání sekvence

Praktická část bakalářské práce se zaměřuje na jednotlivé části procesu návrhu, ukázkou blokového schématu nástroje počínaje, popisem postupu realizace nástroje vedoucím k jeho plné funkčnosti konče.



Obr. 2.1: Nástroj

2.1 Generování zvuku

Jak již bylo zmíněno, nástroj generuje zvuk metodou přímé číslicové syntézy. Samotný proces softwarového generování je souborem několika kroků. Požadovaný průběh je zde definován 256 hodnotami v rozsahu 0-255, uloženými v poli, které jsou analogií k vzorkům vzniklým při převodu spojitého sinusového signálu na diskretní číslicové hodnoty. Postup pro generování např. sinusové vlny je následující: S periodou odpovídající vzorkovací frekvenci je do akumulátoru fáze (16 bit unsigned int) přičítán přírůstek odpovídající frekvenci průběhu, který chceme generovat. Tento přírůstek (v software označen jako *frequency*) je vypočítán na základě požadované frekvence v jednotkách Hz, velikosti akumulátoru a vzorkovací frekvence takto:

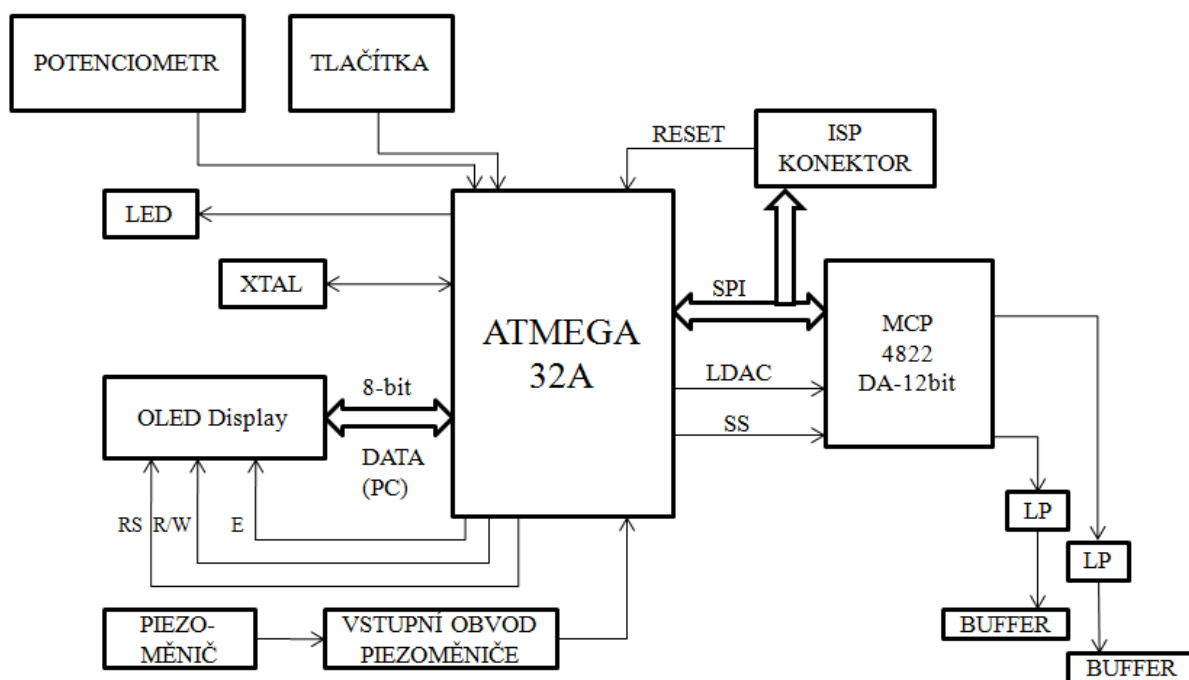
$$frequency = \frac{f_p \cdot 10^n}{f_{vz}}, \quad (2.1)$$

kde f_p je požadovaná frekvence generovaného signálu, n je n -bitová velikost akumulátoru, f_{vz} vzorkovací frekvence.

Chceme-li generovat signál o nízké frekvenci, je nárůst změny fáze pomalý, fázový akumulátor bude načítat hodnoty z tabulky s větším množstvím kroků než v případě, kdy je generován signál o vysoké frekvenci – v tom případě postupuje akumulátor tabulkou rychle, změna/nárůst fáze je větší. Se zvyšující se frekvencí se snižuje počet kroků, které jsou zahrnuty do popisu digitálního průběhu, snižuje se tak v podstatě počet vzorků, kterými je signál tvořen a dochází ke vzniku schodovitého průběhu, který je již poměrně vzdálen analogovému signálu. Čím vyšší je počet vzorků (pole), kterými je signál definován, tím větší musí být i velikost akumulátoru, čímž roste i výpočetní náročnost celého procesu a přesnost výsledného průběhu při dané frekvenci.

2.2 Blokové schéma nástroje

Blokové schéma zobrazuje návrh realizovaného nástroje. Hlavním prvkem nástroje je mikrokontrolér, který slouží jako počítač realizující úpravy vykonané obsluhou pomocí ovládacích prvků (třemi tlačítky a potenciometrem). Software, realizující funkci řízení mikrokontroléru a D/A převodníku, komunikaci s displejem, generování zvuku, nastavování parametrů sekvence, je napsán v programovacím jazyce C, zkompilován do strojového kódu a uložen do paměti programu mikrokontroléru. Součástí nástroje jsou různé periferie popsány níže v této kapitole.



Obr. 2.2: Blokové schéma nástroje

2.3 Periferie nástroje

2.3.1 Potenciometr

Jedná se o lineární potenciometr o hodnotě 10 kΩ (10 k/N), připojený na jeden ze vstupů 10-bitového A/D převodníku mikrokontroléru.

2.3.2 Tlačítka

Všechna tlačítka jsou přes součtový člen, realizovaný diodami, připojena ke vstupu externího přerušení mikrokontroléru, aby při stisku kteréhokoliv z nich došlo k vyvolání přerušení. Piny mikrokontroléru, kterými jsou jednotlivá tlačítka připojena, jsou nastaveny jako vstupy, na pinech jsou povoleny interní pull-up rezistory. V zapojení jsou z důvodu dodržení logických úrovní zapojeny Schottkyho diody, na kterých vzniká menší úbytek napětí, než na klasických diodách s PN přechodem.

2.3.3 Displej

Jedná se o dvouřádkový alfanumerický displej vyrobený firmou Raystaroptronics, model REC001602CRPP5NO. Komunikace mikrokontroléru s displejem probíhá paralelně. K této komunikaci je vyhrazen port C a další tři signály: E (Enable), RS (RegisterSelect), R/W (Read/Write) - na portu D (PD5, PD1, PD7).

2.3.4 Piezoměnič

Jako piezoměnič je použita součástka Kingstate KPS – 100. Na této součástce byla provedena měření, která jsou zobrazena v části měření (Obr. 2.10: Měření na piezoměniči).

2.3.5 Vstupní obvod piezoměniče

Výstupem tohoto obvodu je impulz, který je detekován mikrokontrolérem jako úder k zadání tempa. Zdrojem elektrického signálu, který je usměrněn a zpracován jako impulz je piezoměnič umístěný v dřevěné krabici. V obvodu je jako komparátor zapojen operační zesilovač LM324N, jedná se o tzv. rail to rail operační zesilovač, který umožňuje přiblížit hodnotu výstupního napětí téměř na hodnotu napájecího napětí. Z důvodu předejití problému s rozdílnou intenzitou úderu byl opatřen komparátor potenciometrickým trimrem, kterým lze regulovat jeho citlivost – úroveň, při které dojde k překlopení.

2.3.6 ISP Konektor

Konektor je využit pro uložení zkompilovaného programu do paměti (EEPROM) mikrokontroléru.

2.3.7 LP

Dolní propust prvního řádu je realizována RC členem. Filtr se nachází téměř na konci řetězce, mezní kmitočet low pass filtru leží podle vztahu (1.7) přibližně na hodnotě 10,5 kHz, vzorkovací kmitočet je 22 kHz.

2.3.8 XTAL

Krystalový rezonátor s frekvencí 16 MHz, sloužící k vytvoření hodinového kmitočtu mikrokontroléru společně s oscilátorem, který je součástí mikrokontroléru. [25]

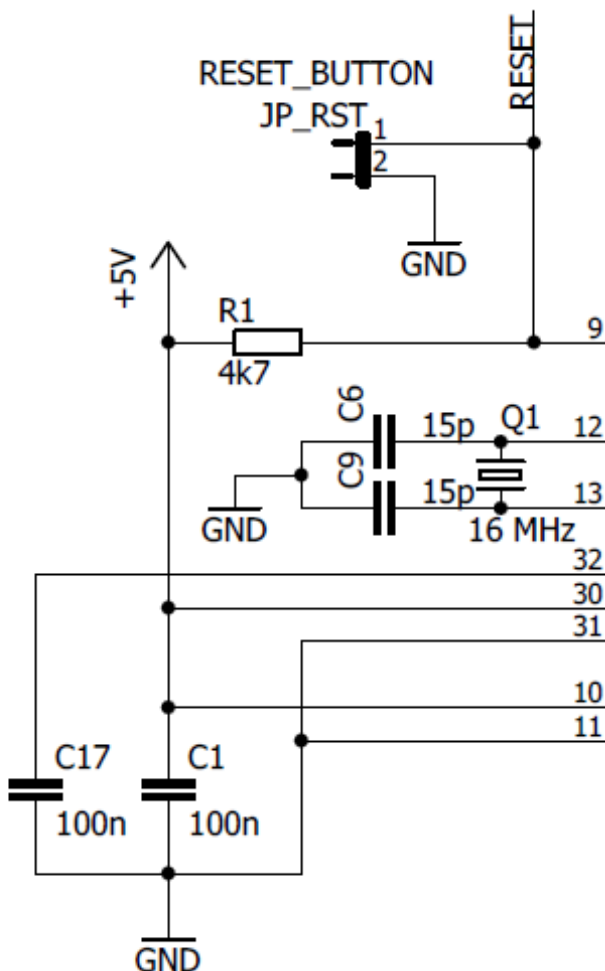
2.3.9 SPI – sběrnice

Používá se pro ISP programování a také pro komunikaci s D/A převodníkem.

2.4 Popis jednotlivých částí navrženého obvodu

Návrh obvodu byl vypracován v programu EAGLE 7.7.0., celé schéma obvodu je přílohou této práce.

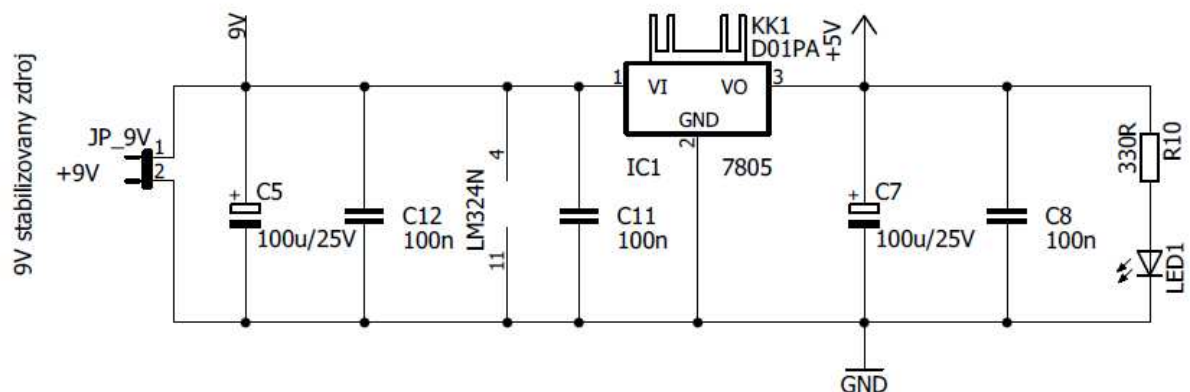
2.4.1 Resetovací obvod, krystalový rezonátor, napájení mikrokontroléru



Obr. 2.3: Reset, rezonátor, napájení

Kondenzátory C9, C6 spolu s krystalovým rezonátorem Q1 tvoří oscilátor viz 2.2.8. Piny konektoru RESET_BUTTON slouží k připojení resetovacího tlačítka, které bylo používáno při ladění programu. Kondenzátor C1 slouží v obvodu jako blokovací kondenzátor. Tento kondenzátor je osazený co nejbližší napájecím pinům mikrokontroléru. Kondenzátor C17 je připojen mezi piny AREF a GND, je zde potřeba pro správnou funkci vnitřní napětové reference A/D převodníku.

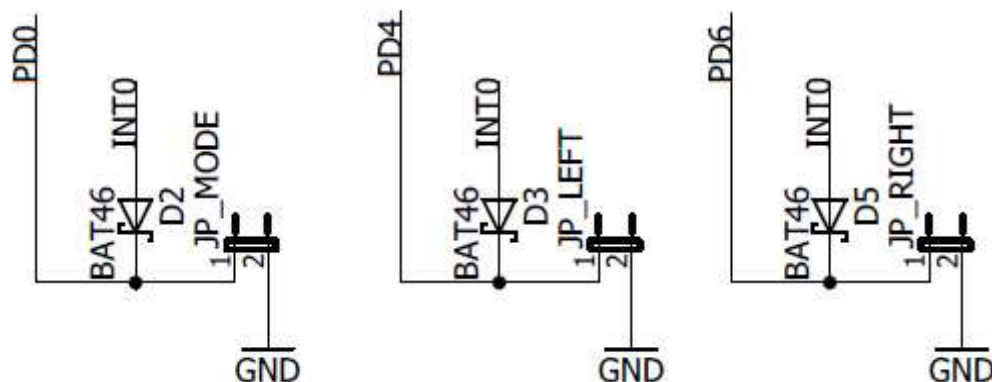
2.4.2 Zdroj napětí



Obr. 2.4: Zdroj napětí

C12 je blokovací kondenzátor ke čtveřici operačních zesilovačů LM324N, 7805 je stabilizátor kladného napětí 5V. C5 slouží k filtraci napájecího napětí 9V. C7 slouží k filtraci stabilizovaného napětí 5V. Led dioda signalizuje přítomnost stabilizovaného napětí. Kondenzátory C11 a C8 jsou do zapojení přidány na doporučení výrobce stabilizátoru.

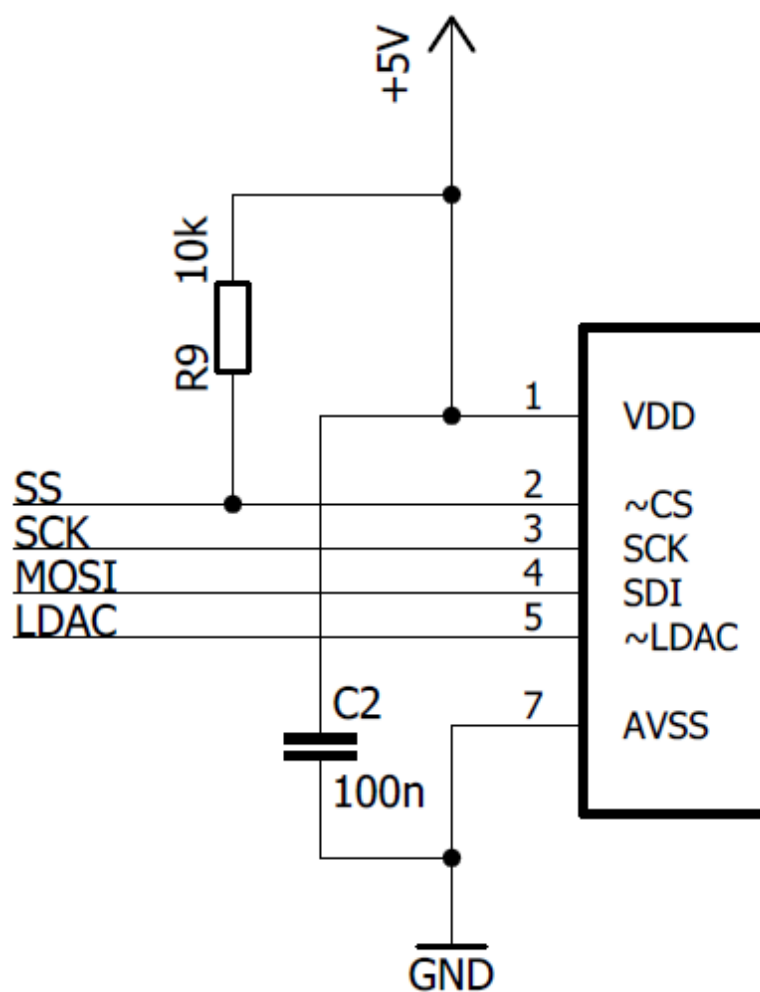
2.4.3 Tlačítka



Obr. 2.5: Tlačítka

Ke každému z tlačítek je připojena dioda, která při stisku kteréhokoliv z tlačítek přivede log.0 kromě jednotlivých pinů portu D i na vstup externího přerušení INT0. Stisk libovolného tlačítka tedy vyvolá přerušení. Jsou použity Schottkyho diody s menším úbytkem napětí, než mají klasické polovodičové diody, aby bylo zajištěno, že bude dodržena napěťová úroveň log.0.

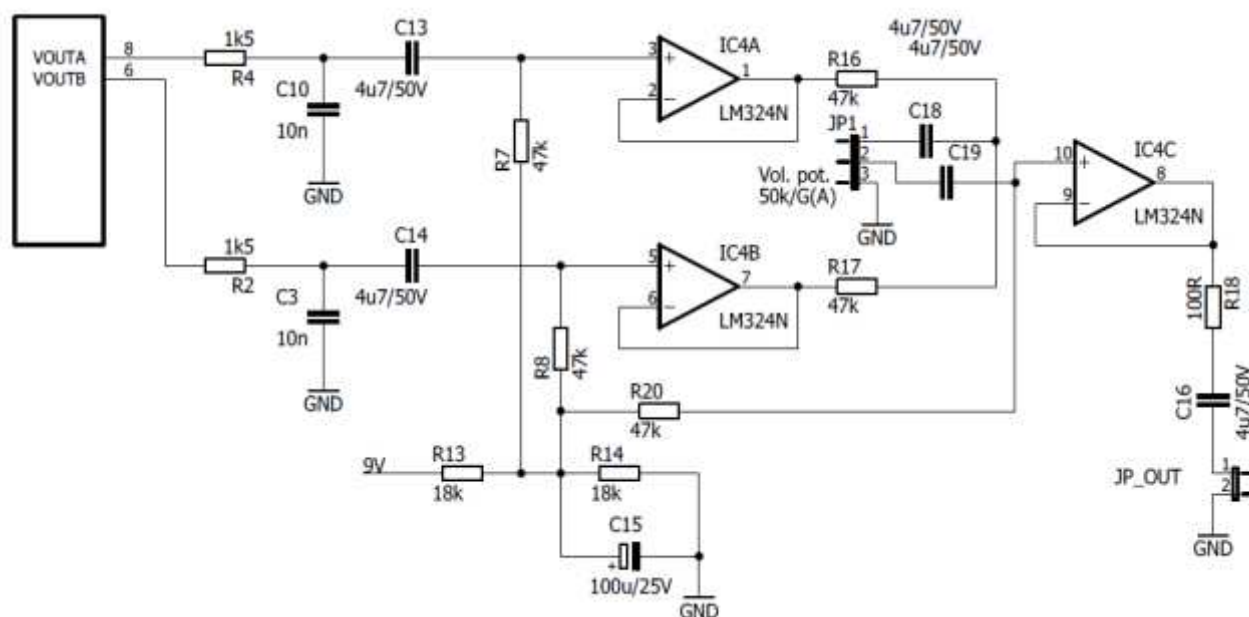
2.4.4 Zapojení D/A převodníku



Obr. 2.6: D/A převodník

Rezistor R9 slouží jako pull-up rezistor pro vstup CS (Chip select) D/A převodníku. Je do obvodu zařazen z toho důvodu, aby při programování mikrokontroléru nedošlo k náhodnému zásahu D/A převodníku do komunikace mezi programátorem a mikrokontrolérem. Kondenzátor C2 zde zastává roli blokovacího kondenzátoru.

2.4.5 Výstupní obvod



Obr. 2.7: Výstupní obvod nástroje

Za oběma z výstupů je zapojena dolní propust s mezním kmitočtem 10,6 kHz, vypočten podle vztahu (5), filtr slouží k vyhlazení schodovitého průběhu signálu z D/A převodníku. Za tímto filtrem je zařazen vazební kondenzátor oddělující stejnosměrnou složku signálu generovaného D/A převodníkem.

Rezistory R13, R14 dělí napájecí napětí na polovinu, tedy 4,5 V. Protože operační zesilovače nejsou napájeny symetricky, je třeba tuto hodnotu napětí použít k vytvoření předpětí na vstupech OZ. Slouží k tomu rezistory R7, R8, R20. Současně však tyto rezistory spolu s vazebními kondenzátory tvoří horní propusti, které ovšem mají mezní kmitočet položený velmi nízko ($f_0 = 0,72$ Hz) a neovlivní (frekvenčně) tak procházející zvukový signál ve slyšitelném pásmu.

Operační zesilovače IC4A, IC4B jsou zapojeny jako sledovače napětí (buffery). D/A převodník v kombinaci se za ním zařazenou dolní propustí nelze příliš zatížit, z toho důvodu je zapojen napěťový sledovač.

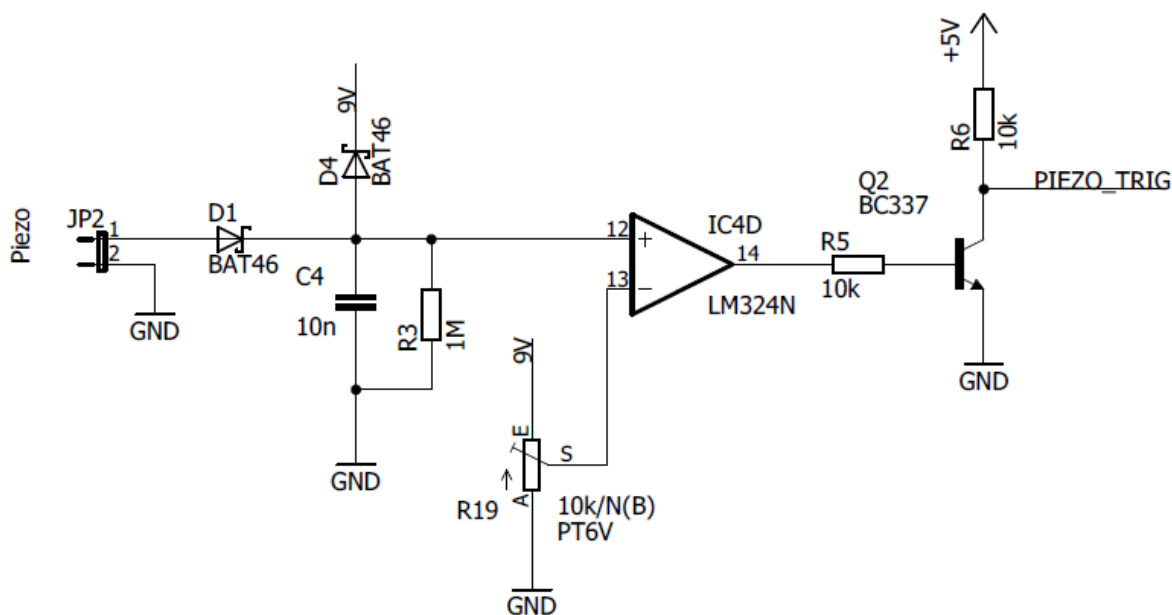
Výstupní sledovač (buffer) IC4C slouží k buzení linky. Rezistor R18 slouží k nastavení hodnoty výstupního odporu. C16 – výstupní vazební kondenzátor.

C18, C19, potažmo i IC4A a IC4B, jsou do obvodu zařazeny kvůli možnosti dalšího rozšíření nástroje obvody upravujícími signál po jejich sečtení se a před vstupem do

výstupního bufferu. V tuto chvíli je zapojen pouze potenciometr určený pro nastavení výstupní hlasitosti.

Vol. pot. 50k/G(A) – na svorku 1 potenciometru je přiveden signál z obou sledovačů a ze svorky 2 je (zeslabený/zesílený) signál přiveden na výstupní napěťový sledovač.

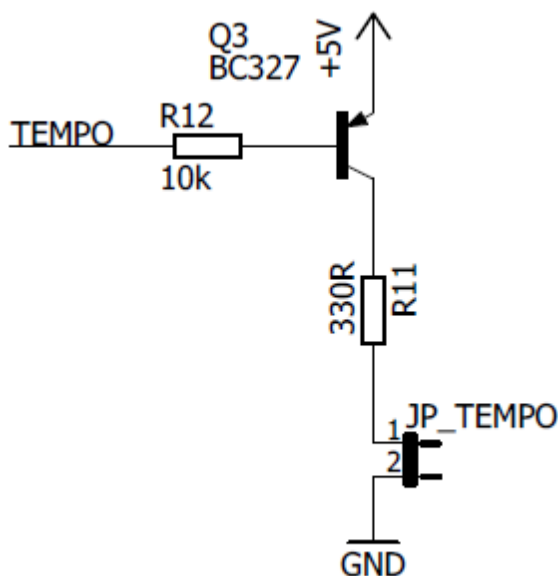
2.4.6 Vstupní obvod piezoměniče



Obr. 2.8: Vstupní obvod piezoměniče

Výstupem tohoto obvodu je impuls, který je detekován mikrokontrolérem jako úder k zadání tempa. V kompletním vstupním obvodu piezoměniče je signál vycházející z piezoměniče po absolvování úderu nejprve usměrněn pomocí první diody D1, posléze je pomocí druhé diody D4 omezen tak, aby nepřekročil napájecí napětí (9 V). Takto upravený signál je dále filtrován RC členem, jeho vliv je demonstrován na obrázku Měření obvodu s RC členem, který spolu s diodou tvoří usměrňovač s kapacitní zátěží. Hodnota rezistoru R3 byla stanovena experimentálně, R3 zde slouží k vybíjení kondenzátoru C4. Takto upravený signál je přiveden na vstup komparátoru, jehož výstupem je obdélníkový signál. Protože na výstupu komparátoru, který je napájen z 9V zdroje, se může objevit pouze jedno ze saturačních napětí (buď cca 0 V anebo cca 9 V) a chceme tímto komparátorem spouštět přerušení mikrokontroléru napájeného stabilizovanými 5 V, je nutné do obvodu zařadit NPN tranzistor (BC337), který úroveň napětí oddělí a současně funguje jako logický invertor. Výstup komparátoru je tedy přes rezistor R5, který omezuje proud, připojen do báze a přes rezistor R6 je kolektor držen na úrovni 5 V. Jestliže se komparátor překloupí do stavu kladné saturace, tranzistor sepne

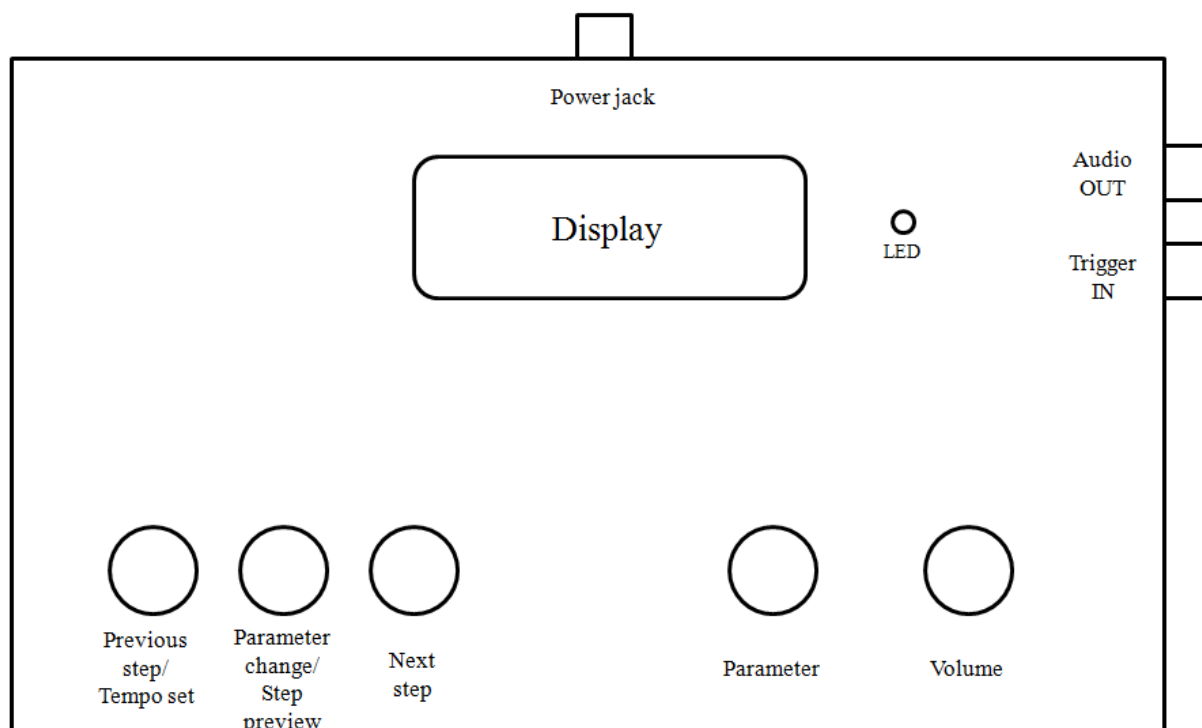
a napětí na kolektoru přejde na úroveň blízkou 0 V, tedy log.0. Touto nulou, resp. hranou z log.1 na log.0, je pak vyvoláno přerušení INT1. Aby bylo možné upravovat citlivost piezoměniče v závislosti na síle úderu, je na druhý (invertující) vstup OZ připojen dělič napětí realizovaný trimrem R19, který nastavování citlivosti umožňuje.



Obr. 2.9: Obvod s tranzistorem

Pro buzení LED diody je použit tranzistor BC327, zapojený jako spínač. Protože má tranzistor vodivost PNP, je jeho emitor připojen ke kladnému napětí 5 V. Báze je přes rezistor R12, omezující proud, připojena k portu mikrokontroléru, nastavenému jako výstup s aktivovaným vnitřním pull-up rezistorem. Na kolektor je připojena LED dioda (svorky pinu JP_TEMPO) přes rezistor R11, nastavující proud diodou na přibližnou hodnotu 5-10 mA, podle zvoleného typu LED.

2.5 Ovládací prvky nástroje a možnosti nastavení



Obr. 2.10: Grafický návrh nástroje

2.5.1 Potenciometr

Ovládací prvek potenciometr slouží v nástroji k nastavování parametrů signálu.

Potenciometr Parameter

Potenciometrem Parameter uživatel ovlivňuje hodnotu nastavovaného parametru.

Potenciometr Volume

Potenciometrem Volume uživatel nastavuje požadovanou hlasitost na výstupu nástroje.

2.5.2 Tlačítka

Tlačítka sloužící k přepínání mezi parametry nastavovanými potenciometrem.

Tlačítko Parameter change/Step preview

Stlačením tlačítka se mění parametr, který je nastavován. Podržením tohoto tlačítka dojde k přehrávání aktuálně nastavovaného kroku v sekvenci.

Tlačítko Next step

Tlačítkem Next step se uživatel pohybuje mezi jednotlivými kroky (1-16) sekvence.

Tlačítko Previous step/Tempo set

Tlačítko sloužící k pohybu mezi jednotlivými nastavovanými kroky (16–1), při stisknutí a podržení tlačítka dojde k aktivaci nabídky Tempo set, která umožňuje nastavení tempa přehrávání.

2.5.3 Konektory

Napájecí, výstupní a propojovací konektory nástroje.

Power jack

Konektor v šasi nástroje, sloužící k připojení napájecího zdroje/adaptéru.

Audio OUT

Výstupní signály z obou kanálů D/A převodníku jsou sečteny a přivedeny jako MONO signál na konektor Audio OUT.

Trigger IN

K propojení nástroje s piezoměničem je na nástroji umístěn konektor Trigger IN. Piezoměnič slouží k zadání časového intervalu, který ovlivňuje tempo přehrávání zadané sekvence, a spouštění nastavené sekvence.

2.5.4 LED

Dioda signalizuje uživateli, zda došlo k zaznamenání jeho pokynu pomocí piezoměniče, či nikoli. Při dostatečném úderu, tedy dostatečné úrovni vybuzení piezoměniče, dojde k jejímu probliknutí. Při přehrávání znázorňuje přednastavené tempo přehrávané sekvence.

2.5.5 OLED Display

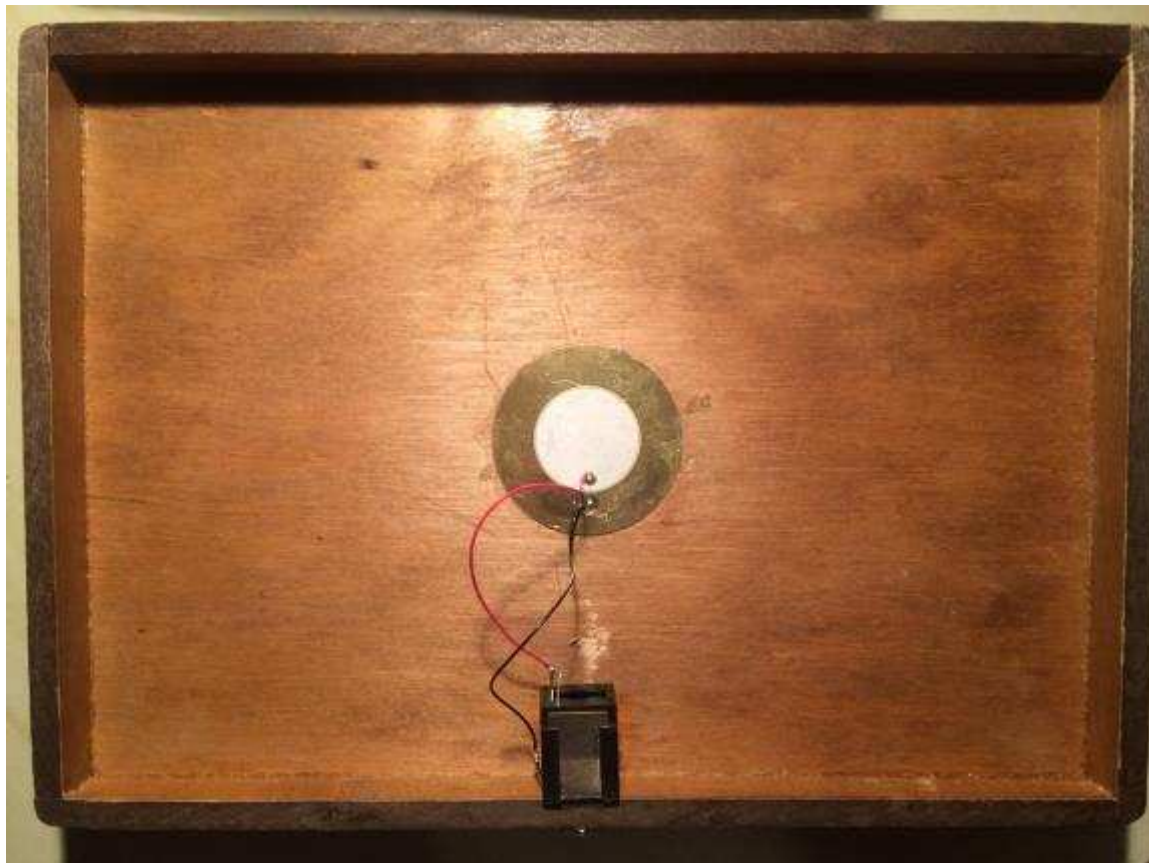
Pro účely komunikace nástroje s uživatelem byl v nástroji použit dvouřádkový OLED displej, který uživateli umožňuje nastavování parametrů. Obrázek 2.10 znázorňuje příklad zobrazení nastavování parametrů na displeji, konkrétně nastavení hlasitosti prvního oscilátoru v devátém kroku sekvence.



Obr. 2.11: Příklad nastavovaného parametru na displeji

2.5.6 Pad

Druhou částí nástroje je dřevěná krabička, ve které je umístěn piezoměnič. Pad slouží jako další ovládací prvek (spouštění přehrávání a k nastavení tempa přehrávání). Vnější strana krabičky je opatřena gumovou vrstvou, která mírní úder paličky.



Obr. 2.12: Pad opatřený piezoměničem a mono jackem

2.5.7 Nastavované parametry

V softwarovém prostředí byly nastaveny tyto parametry dostupné uživateli k jejich navolení:

- Nota – nástroj disponuje rozsahem dvou oktáv $C = 65,4 \text{ Hz}$ – $h = 246,94 \text{ Hz}$.
Uživatel může nastavit požadovaný tón s rozlišením půltónů, celkem má na výběr 24 tónů z chromatické stupnice (12 půltónů na oktávu). Z důvodu dodržení anglického značení nástroje je tón H/h vyjádřen anglickým symbolem pro tento tón – B/b.
- Oktáva – přepnutí mezi první nebo druhou oktávou, první oktáva má tón C o frekvenci 65,41 Hz, tón c druhé oktávy má frekvenci 130,81 Hz.

- Průběh – na každém z oscilátorů si uživatel volí jeden z průběhů; sinusový, obdélníkový, trojúhelníkový nebo pilovitý. Uživatel v tomto kroku může nastavit parametr Waveform na volbu „Off“, čímž v podstatě oscilátor vypne – negeneruje pak žádný signál.
- Míra rozladění – umožňuje změnu frekvence druhého oscilátoru vůči prvnímu v řádu desetin Hz.
- Hlasitost – nastavením hlasitosti zobrazené na displeji si uživatel může nastavit hlasitost/poměr hlasitostí obou oscilátorů viz Obr. 2.11. Hlasitost výstupního sečteného signálu se nastavuje potenciometrem Volume.
- Fáze – pro další podpoření experimentálního charakteru byl nástroj opatřený také možností posunutí jednoho signálu vůči druhému. Na displeji se údaj o vzájemném posuvu zobrazuje ve stupních.
- Tempo – jeho nastavení se provádí dvěma údery do padu – dřevěné krabice, která je součástí nástroje opatřená piezoměničem. Prvním úderem se spouští časovač měřící dobu trvání jednoho kroku, druhým úderem se časovač zastaví a předává informaci o délce trvání, tento proces uživateli umožňuje přehrávání sekvence v požadovaném tempu.

2.6 Obsluha nástroje

Samotná obsluha, tedy nastavování parametrů a spouštění se provádí za pomoci tlačítek, potenciometrů a padu popsanych v kapitole Ovládací prvky nástroje. V této kapitole vysvětlují jednotlivé kroky vedoucí od spuštění nástroje k přehrávání melodie v požadovaném tempu.

- Zapnutí nástroje – nástroj je aktivován připojením napájecího adaptéru, dojde k rozsvícení displeje, nástroj je tak připraven k nastavování.
- Po zapnutí následuje nastavení prvního kroku, na displeji svítí v horním řádku po celou dobu úprav „Step: 1 / 16“, ve spodním řádku je pak v prvním kroku napsáno „Note: “, ve kterém si uživatel může pomocí potenciometru Parameter vybrat jeden tón z oktávy.
- Pomocí tlačítka Parameter change se posuneme k dalšímu kroku, kterým je volba oktávy, ve spodním řádku se zobrazuje nápis „Octave: “, je zde na výběr ze dvou po sobě jdoucích oktáv označených „1“ nebo „2“.

- Následujícím krokem je výběr průběhu signálu generovaného prvním oscilátorem, zobrazující se jako „Waveform1:“, potenciometrem si uživatel vybírá jeden ze čtyř průběhů:
 1. Sinusový – „sin“
 2. Trojúhelníkový – „tri“
 3. Obdélníkový – „sqr“
 4. Pilovitý – „saw“
 5. Off
- Další krok je shodný s předchozím krokem s tím rozdílem, že se vybírá průběh na druhém oscilátoru, na spodním řádku displeje je tedy napsáno „Waveform2:“, výběr z nabízených průběhů je shodný.
- Aby bylo možné dosáhnout různých zvukových kombinací, tlačítkem Parameter change se přesuneme k nastavení hlasitosti oscilátoru. „Volume1:“ na spodním řádku displeje indikuje nastavení hlasitosti prvního oscilátoru, po dalším stisknutí tlačítka se na displeji objeví nápis „Volume2:“ pro nastavení hlasitosti druhého oscilátoru.
- Při nastavování rozladění druhého oscilátoru vůči prvnímu se uživatel pohybuje v intervalu 0–5 Hz s krokem 0,2 Hz, na spodním řádku displeje je například „F.diff 50/10“, tento poměr vyjadřuje míru rozladění.
- Po zvolení míry rozladění přichází možnost zpoždění druhého oscilátoru (generovaného signálu) vůči prvnímu. Na displeji se zobrazí nápis „Phase:“, uživatel nastaví hodnotu fázového posuvu ve stupních od 0 do 180.
- Tlačítka Next step a Previous step lze přecházet mezi jednotlivými kroky, kterých je celkem šestnáct. Na displeji se mění nápis v horním řádku, např. „Step: 2 / 16“ a uživatel tak může nastavit parametr každého z kroků tak, aby si dle vlastní iniciativy vytvořil libovolnou melodii.
- Podržením stisknutého tlačítka Previous step/Tempo set ose na displeji objeví hláška „Hit trigger 2x“, která uživatele vyzve k zadání tempa dvěma údery do padu. Uživatel dvěma údery (například paličkou) zadá tempo přehrávání.

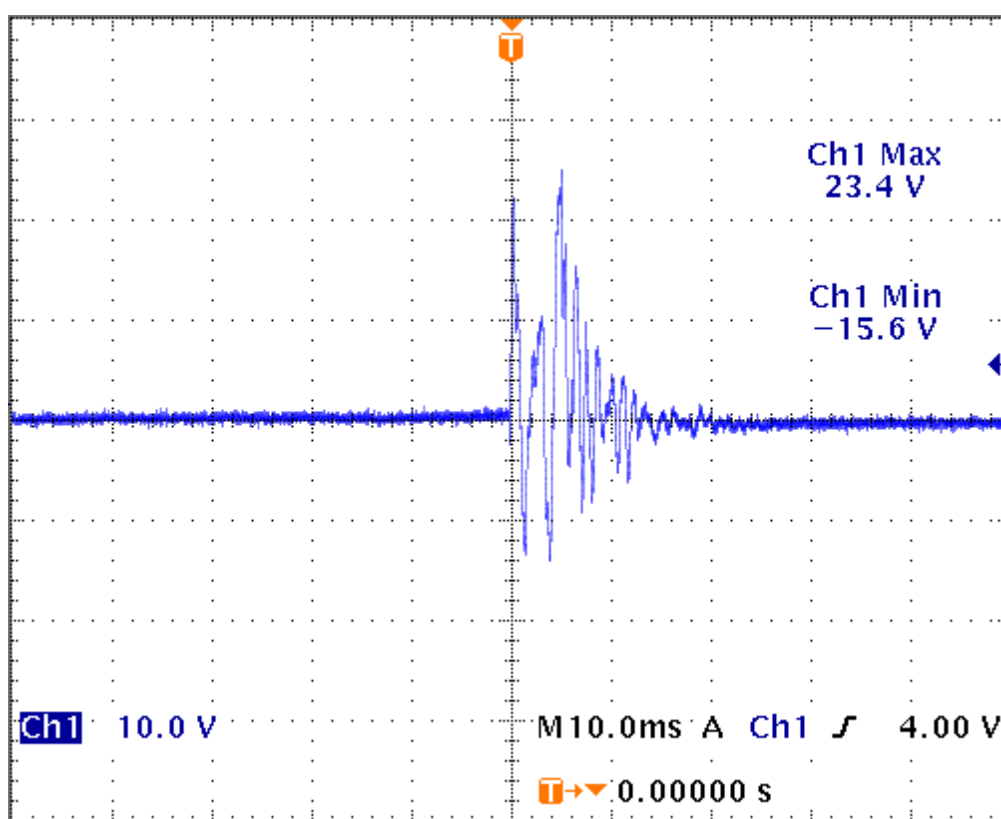
- Výše uvedeným postupem je nástroj připraven k přehrávání vytvořené sekvence. Tato sekvence se spouští jedním úderem do padu.
- Hlasitost výstupního signálu je možno upravit potenciometrem Volume.

2.7 Měření v obvodu

V této části jsou obrázky získané z osciloskopu ilustrující funkce obvodu a průběhy signálů v něm. Další snímky jsou umístěny v části A přílohy.

2.7.1 Piezoměnič

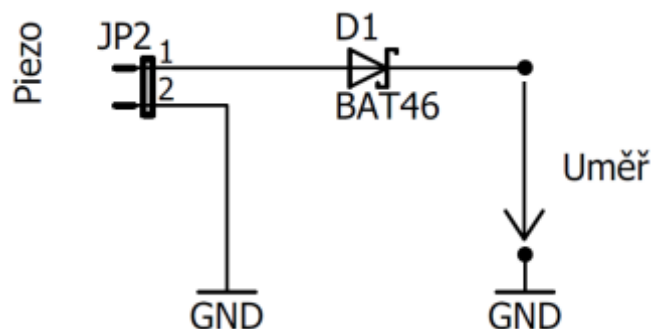
První z grafů zobrazuje průběh napětí v čase po úderu absolvovaném piezoměničem, osciloskop byl připojen na kladnou a zápornou svorku piezoměniče.



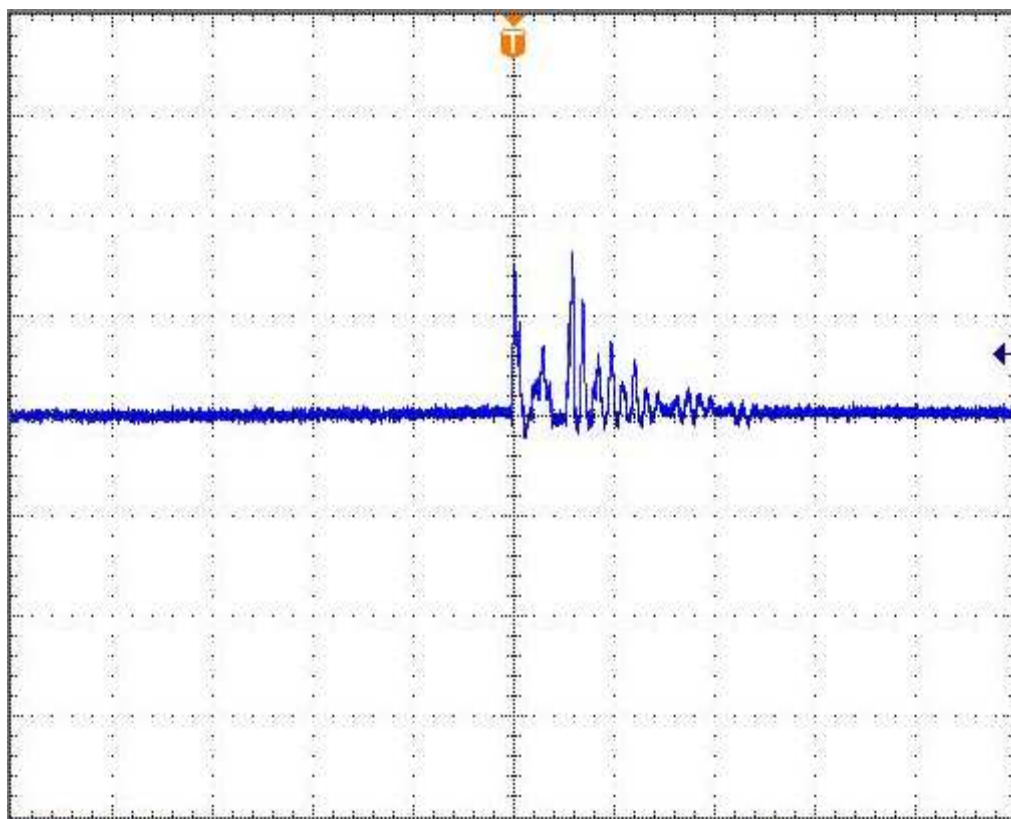
Obr. 2.13: Měření na piezoměniči

2.7.2 Obvod s diodou

Pro usměrnění signálu – propuštění pouze jeho kladné půlvlny – je v zapojení využita dioda, která zamezuje průchodu záporné půlvlny signálu.



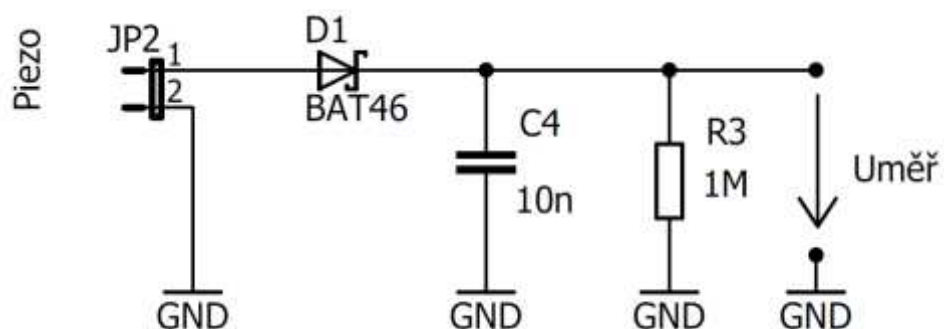
Obr. 2.14: Schéma měřeného obvodu s diodou



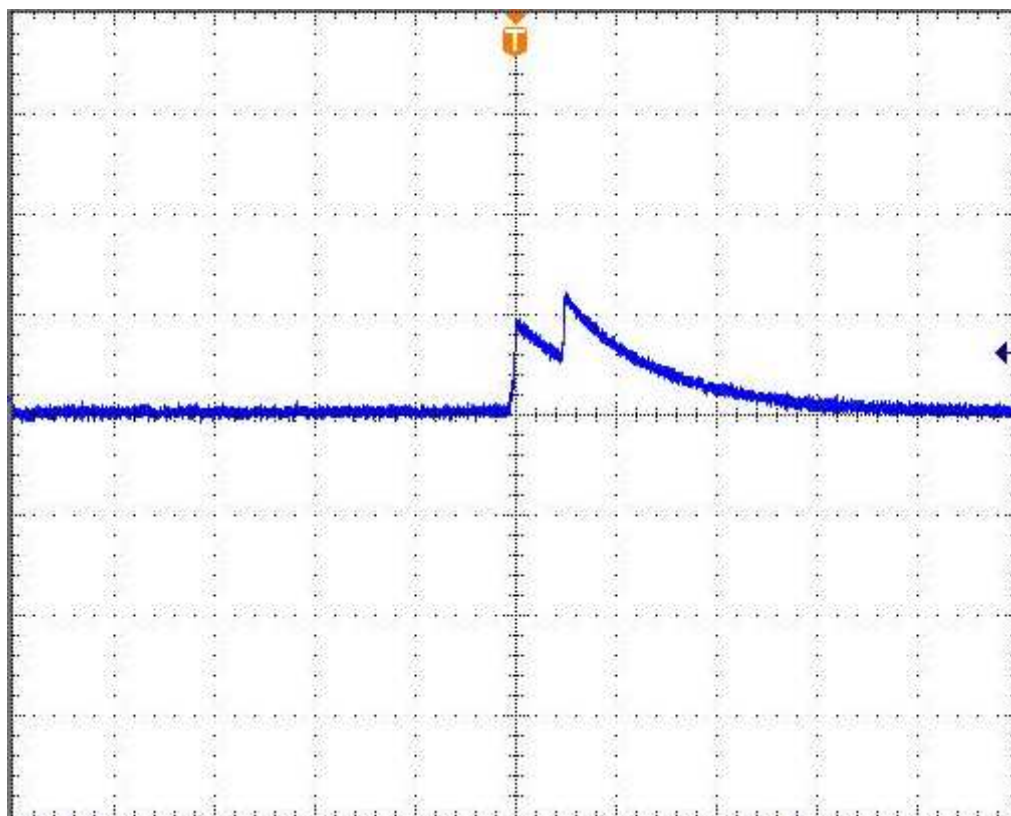
Obr. 2.15: Měření v obvodu s diodou

2.7.3 Obvod s diodou, kondenzátorem a rezistorem

Vlivem kondenzátoru dojde k vyhlazení signálu, který kopíruje tvar obálky signálu z předchozího měření.



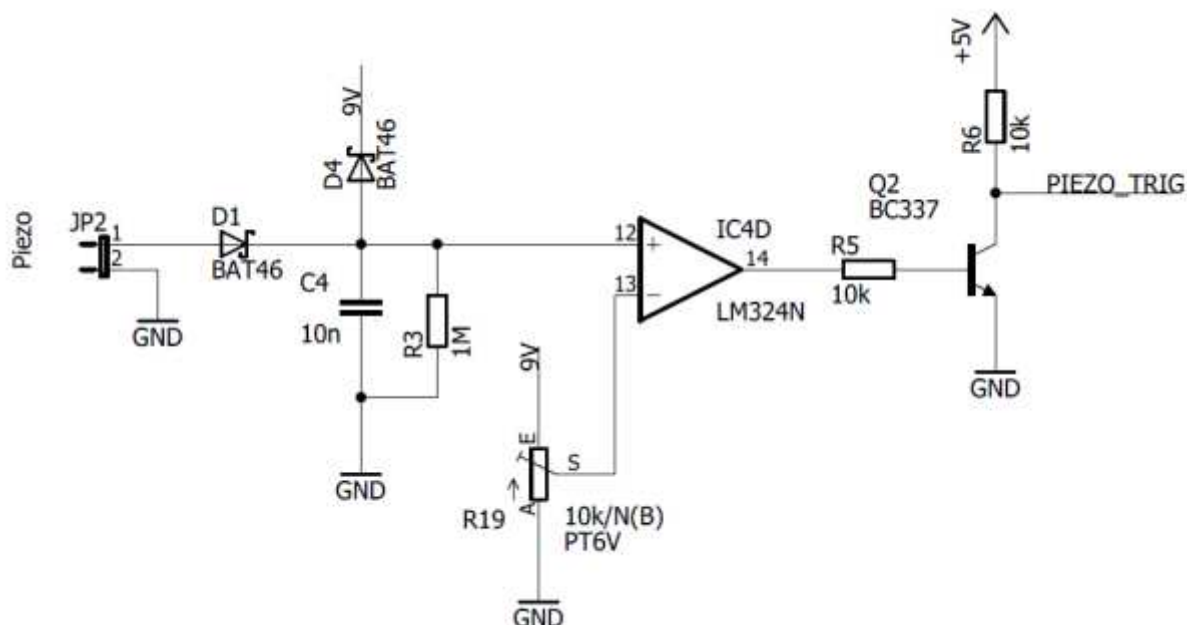
Obr. 2.16: Schéma měřeného obvodu s RC členem



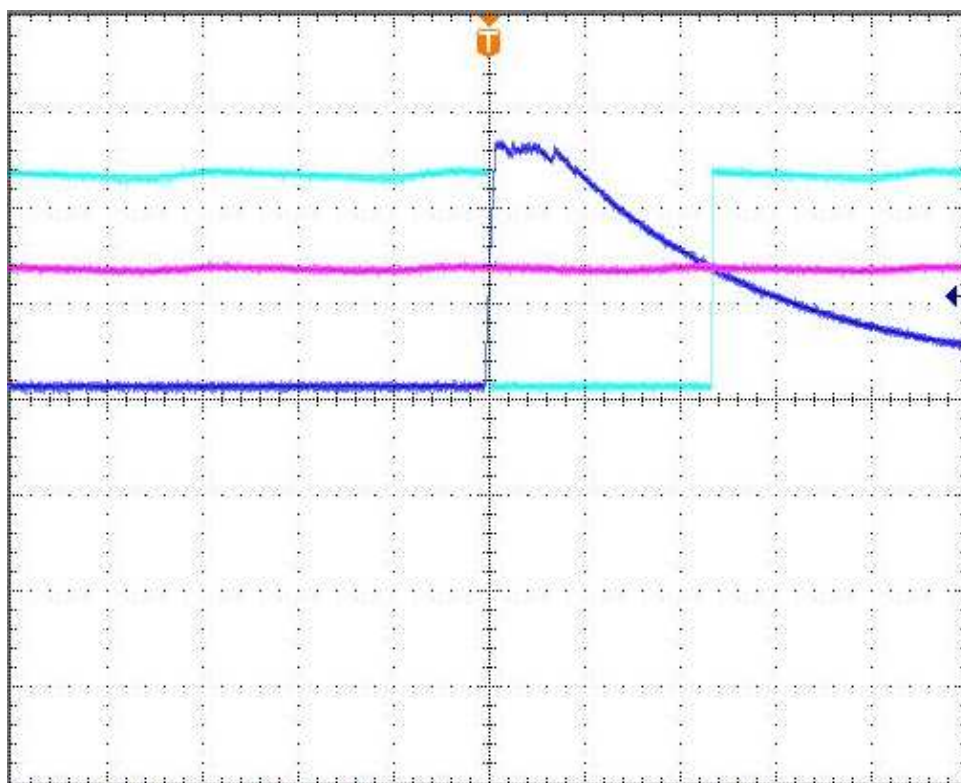
Obr. 2.17: Měření v obvodu s RC členem

2.7.4 Obvod s komparátorem

Na obrázku Měření vstupního obvodu lze vidět tři průběhy. Fialový je průběh napětí na zdroji, tmavě modrý je průběh signálu na piezoměniči a světle modrý je průběh napětí na výstupu komparátoru. Dostatečně silným úderem dosáhne generované napětí na piezoměniči takové úrovně, při které dojde k překlopení komparátoru.



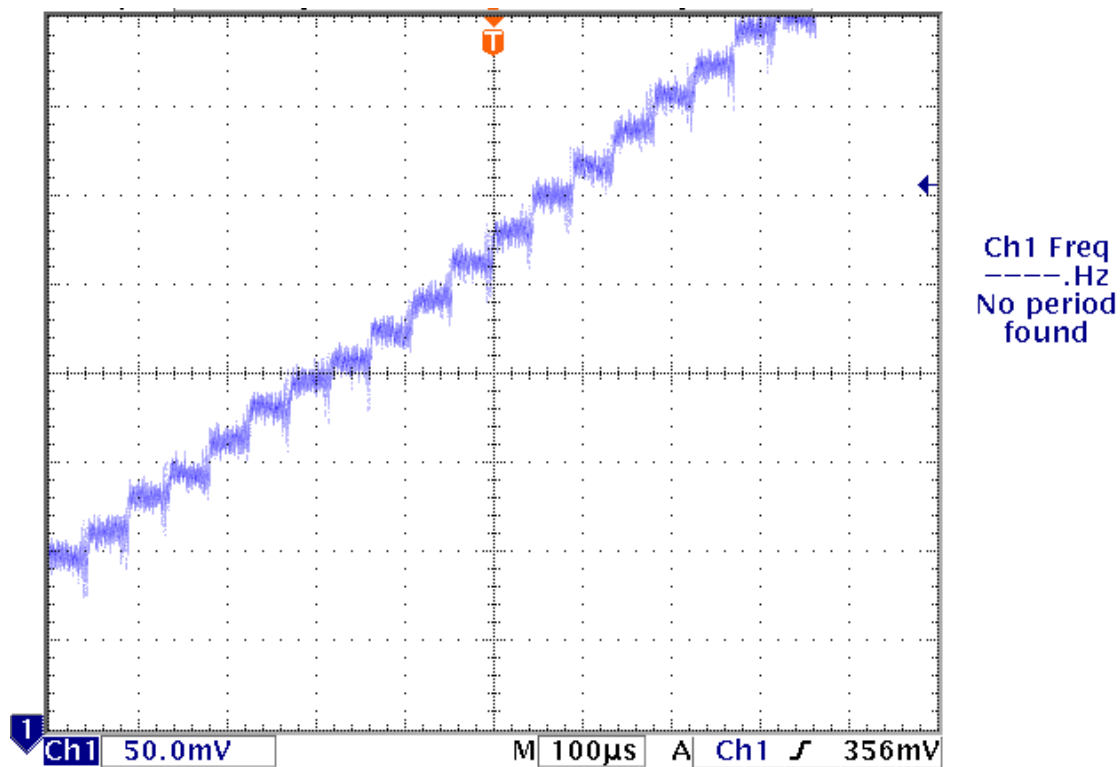
Obr. 2.18: Schéma obvodu piezoměniče



Obr. 2.19: Měření vstupního obvodu

2.7.5 Schodovitý průběh před filtrací RC členem

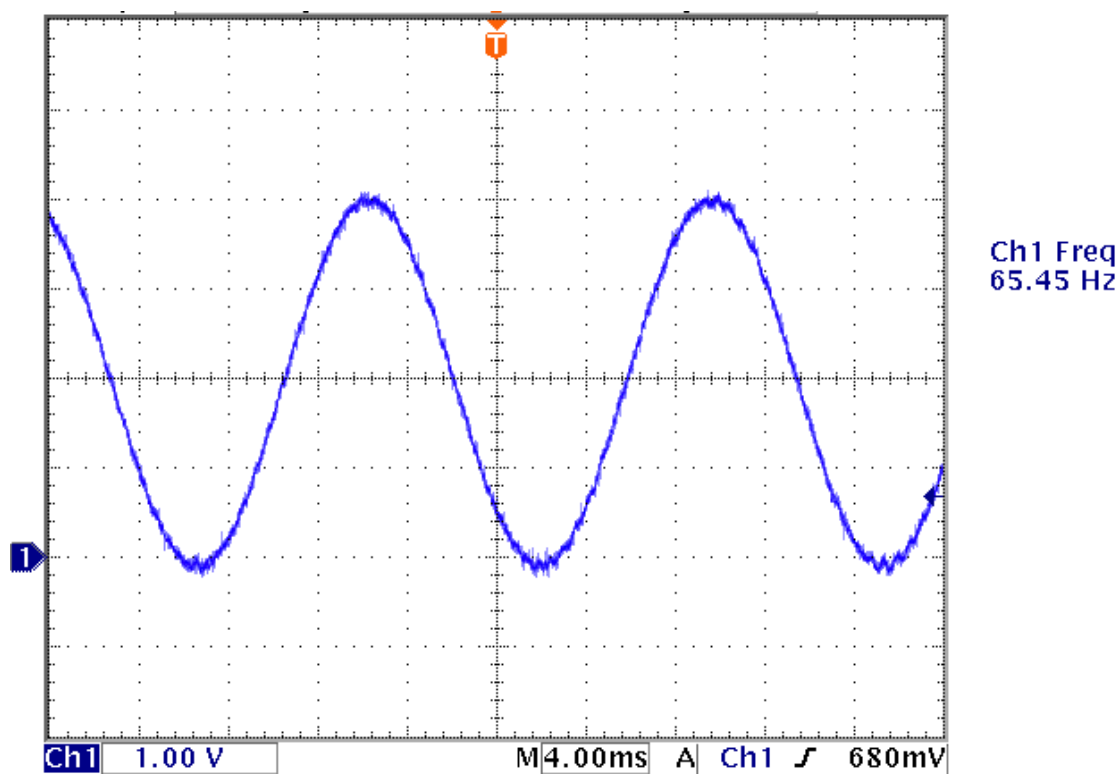
Snímek schodovitého průběhu signálu byl pořízen v části obvodu za jedním z výstupů D/A převodníku, signál je následně upraven pomocí filtru typu dolní propust tvořené rezistory R2, R4 a kondenzátory C3 a C10 za účelem minimalizace těchto schodů vzniklých převodem číslicového signálu na analogový.



Obr. 2.20: Schodovitý průběh signálu

2.7.6 Sinusový průběh o nejnižší generované frekvenci

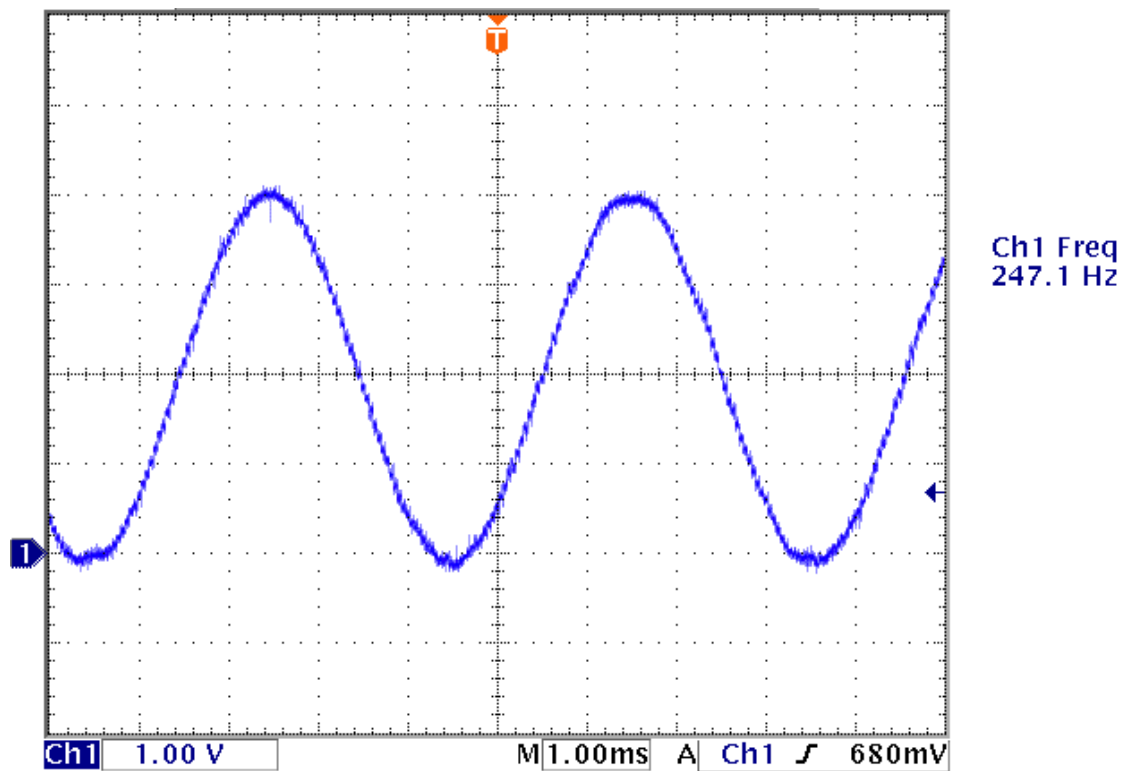
Na obrázku je snímek z osciloskopu zachycující průběh sinusového signálu o nejnižší možné frekvenci – 65,45 Hz. Průběh nejeví známky schodovitosti, které souvisejí se softwarově generovaným průběhem – čím nižší je generovaná frekvence, tím větší je počet vzorků obsažených v jedné periodě cyklu akumulátoru.



Obr. 2.21: Sinusový průběh – nejnižší frekvence

2.7.7 Sinusový průběh o nejvyšší generované frekvenci

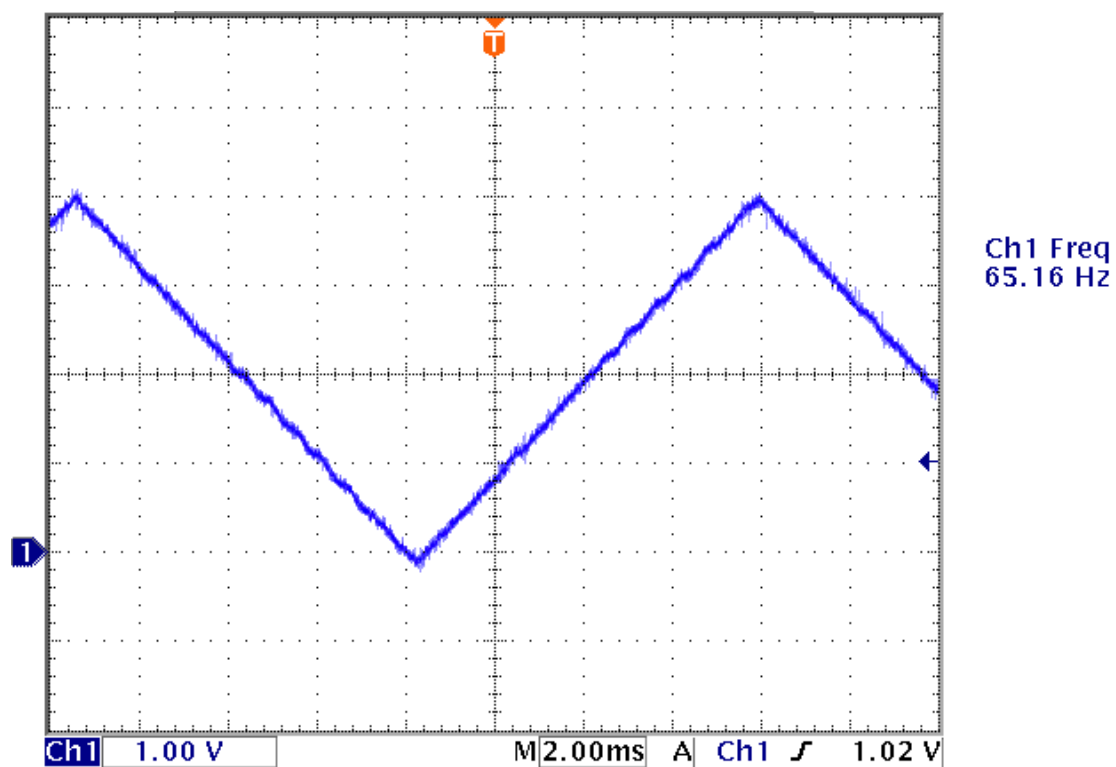
Tento průběh demonstruje nedostatečný počet vzorků při generování signálu o nejvyšší frekvenci (247,1 Hz) nastavované uživatelem. Vlivem sníženého množství vzorků, které se při DDS podílejí na tvorbě zvukového signálu o vysoké frekvenci je z obrázku zřejmé zkreslení sinusového signálu.



Obr. 2.22: Sinusový průběh – schodovitost signálu

2.7.8 Trojúhelníkový průběh

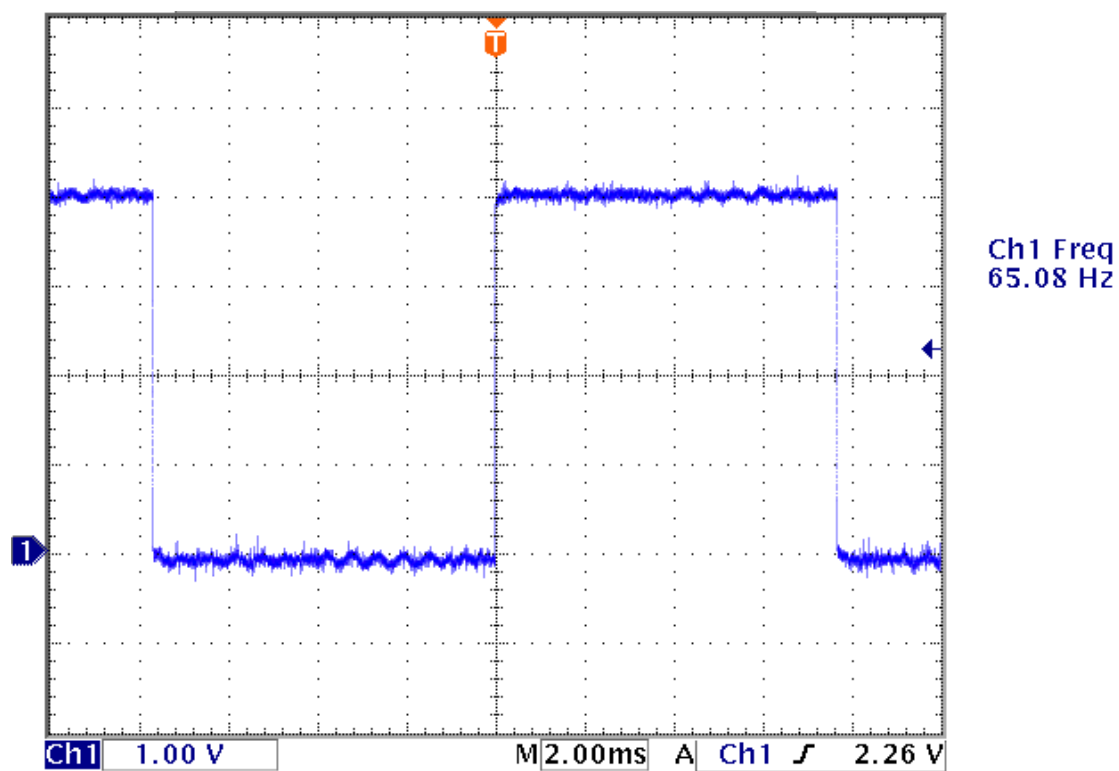
Ukázka trojúhelníkového průběhu generovaného nástrojem o frekvenci 65,16 Hz.



Obr. 2.23: Trojúhelníkový průběh

2.7.9 Obdélníkový průběh

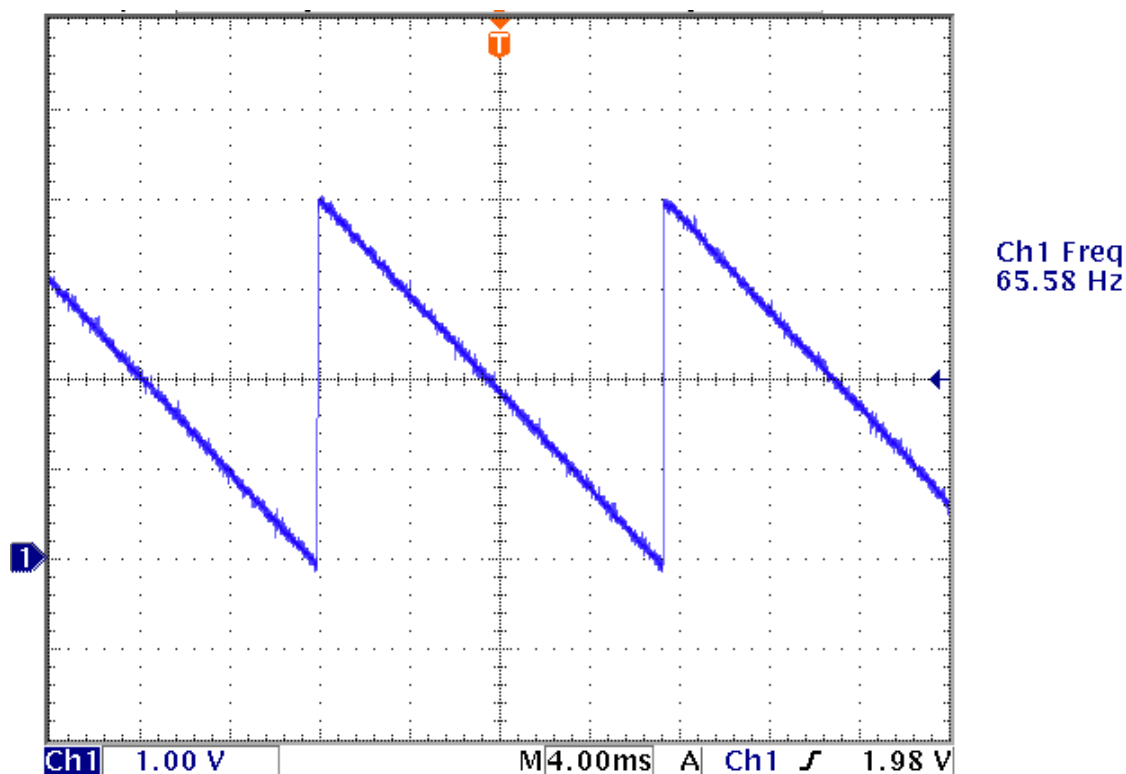
Ukázka obdélníkového průběhu generovaného nástrojem o frekvenci 65,08 Hz.



Obr. 2.24: Obdélníkový průběh

2.7.10 Pilovitý průběh

Ukázka pilovitého průběhu generovaného nástrojem o frekvenci 65,58 Hz.



Obr. 2.25: Pilovitý průběh

2.8 Software

Program byl napsán v jazyce C, ve vývojovém prostředí Eclipse IDE a zkompileován pomocí AVR-GCC Toolchain a AVR GNU Make Builder. Strojový kód byl nahrán do mikrokontroléru pomocí programátoru AVR Dragon.

2.8.1 Hlavní program – main()

Po resetu mikrokontroléru se jako první začne vykonávat procedura main(), tedy hlavní program. Ta začíná inicializačními funkcemi, které nastavují a spouštějí funkci jednotlivých periférií a částí mikrokontroléru, jmenovitě OLED displej, externí přerušení INT0 a INT1 (tlačítka a piezoměnič), SPI sběrnice (pro komunikaci s D/A převodníkem), 16bit časovač TC1 (vzorkovací frekvence), A/D převodník (vstup z potenciometru). Po poslední inicializaci je globálně povoleno přerušení.

Po dokončení se v nekonečné smyčce začnou vykonávat činnosti, které nejsou časově kritické, nebo jsou příliš časově náročné na to, aby byly prováděny při každém přetečení časovače TC1, tzn. se vzorkovací frekvencí.

1. Nastavení parametrů oscilátorů podle aktuální pozice v sekvenci (aktuálního stepu), tzn. program načte hodnoty z polí, ve kterých jsou uloženy parametry pro všechny stepy sekvence. Každý parametr má své pole o šestnácti místech, přičemž na každém z míst je hodnota daného parametru, pro daný krok, např. $osc1_waveform = sequence_osc1_waveform[sequence_position]$;
2. Výpočet přírůstku akumulátoru fáze pro aktuální frekvenci. Jedná se o náročný výpočet pro pouze 8-bitový procesor, proto je zařazen do hlavního programu. Vzorec byl už výše zmíněn (viz vzorec 2.1), konkrétní výpočet vypadá například takto:

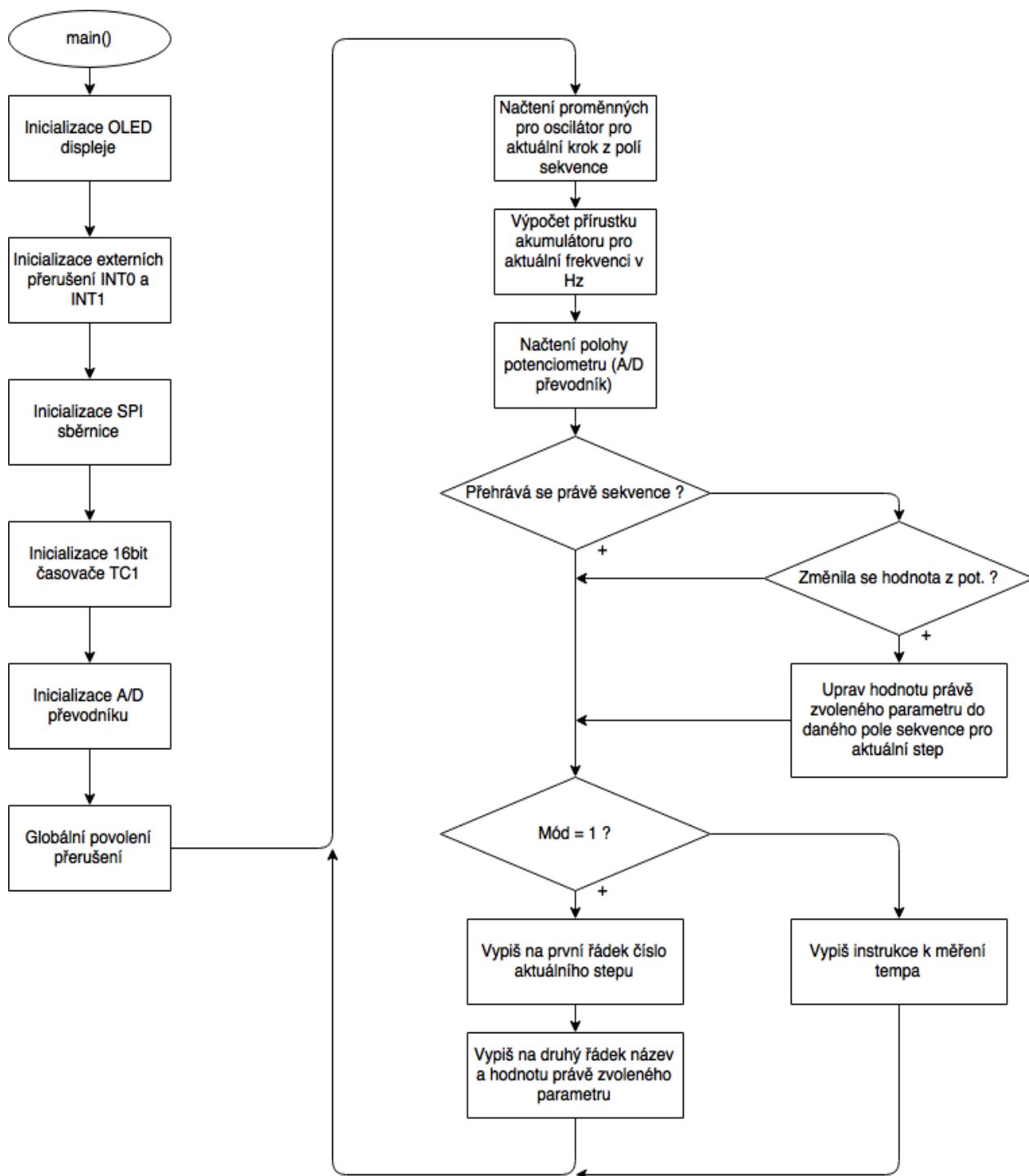
Akumulátor je 16-bitový a vzorkovací frekvence je 22 kHz, po dosazení tedy:

$$frequency = \frac{frequency_{Hz} \cdot 10^{16}}{22000} = \frac{frequency_{Hz} \cdot 65536}{22000}.$$

Pro druhý oscilátor probíhá výpočet podobně. Rozdíl je pouze v tom, že proměnná $frequency_{Hz}$ se navýší o rozdíl, nastavený pro daný krok uživatelem. Tento rozdíl je načten v kroku 1, spolu s ostatními parametry.

3. Načtení polohy potenciometru (hodnoty z A/D převodníku). Tato hodnota je porovnána s hodnotou A/D převodníku při posledním nastavování parametru. Pokud se tedy zrovna nepřehrává sekvence a je tedy povoleno nastavování parametrů, změní se daný parametr pouze tehdy, pohne-li uživatel s potenciometrem tak moc, že se nově načtená hodnota změní od hodnoty při minulém nastavování o víc než 5. A/D převodník má rozlišení 8 bitů, jedná se tedy jen o několik stupňů. Pokud dojde k dostatečné změně, nově načtená hodnota je přepočítána na rozsah parametru, na který je zrovna “přepnuto” a hodnota je uložena do příslušného pole, k příslušnému kroku, např. takto: $sequence_osc1_waveform[sequence_position] = (adcParam*3)/255$;
4. Vypsání čísla aktuálního kroku a aktuálně nastaveného parametru, včetně jeho hodnoty na displej, pokud je zvolen mód 1. Ten je nastaven, když se přehrává sekvence, nebo se nastavují její kroky, resp. parametry jednotlivých kroků. Druhou možností je mód 0, tedy mód nastavování tempa. Jestliže je zvolen mód 0, jsou na displej vypsány instrukce k nastavení tempa pomocí padu opatřeného piezosnímačem (piezotrigger).

Vývojový diagram



Nastane-li přerušení INT0, znamená to, že bylo zmáčknuto některé z tlačítek. Kvůli tzv. debouncingu (odstranění efektu zakmitávání tlačítek) používá program proměnnou keyEnable, která říká, jestli má program reagovat zmáčknutím tlačítka. Jak je debouncing implementován bude popsáno níže. Činnost podprogramu pro INT0 je následující:

1. Jestliže je zakázáno čtení kláves pomocí keyEnable, ukončí se podprogram přerušení. Jestliže ne, je zakázáno čtení kláves – keyEnable = 0 a pokračuje se na krok 2.
2. Bylo-li stisknuto levé (previous) tlačítko, posun v sekvenci o krok zpět.
3. Bylo-li stisknuto pravé (next) tlačítko, posun v sekvenci o krok vpřed.
4. Bylo-li stisknuto tlačítko parameter, přepni aktuální parametr na další v řadě.
5. Konec podprogramu přerušení.

2.8.2 Podprogram přerušení INT1 – piezo trigger

Na vstup externího přerušení je připojen obvod zpracovávající výstupní napětí z piezoměniče tak, že dojde zavolání přerušení INT1, při úderu do plochy nad měničem. Činnost podprogramu pro INT1 je následující:

1. Jestliže je aktivní mód 1, tedy přehrávání sekvence, či nastavování parametrů, testuje se, zda je zrovna přehrávána sekvence. Pokud ano, potom je přehrávání zastaveno, v opačném případě je přehrávání spuštěno od začátku.
2. Jestliže není aktivní mód 1, pak to musí být mód 0. V tomto módu se má stanovovat a nastavovat nové tempo tím, že se změří čas mezi dvěma údery. Samotné měření obstarává podprogram přerušení při přetečení časovače TC1. Spouštění a vypínání tohoto měření se však děje v tomto kroku. Je-li tedy aktivní mód 0 a je spuštěno měření tempa, pak je měření zastaveno, zapsáno nové tempo (viz Podprogram přerušení – přetečení TC1), a mód přepnut na 1. V opačném případě (měření ještě není spuštěno), podprogram spustí měření.
3. Konec podprogramu přerušení.

Vývojový diagram



2.8.3 Podprogram přerušení – přetečení TC1, debouncing

Tento podprogram slouží k načasování nastavování vzorků výstupních D/A převodníků, tedy nastavení vzorkovací frekvence výstupu. Časovač TC1 je nastaven tak, aby přetékal s frekvencí 22 kHz, a protože je tento podprogram volán při přetečení TC1, je frekvence volání tohoto podprogramu oněch 22 kHz.

Při každém zavolání se kromě zapsání výstupních hodnot do D/A převodníků provede ještě několik dalších činností, ke kterým je časovač využit. Ty jsou popsány níže. Jejich konkrétní pořadí a logika s jakou se provádějí je vidět z vývojového diagramu níže.

Výpočet nastavení čítacího registru TC1

Požadovaná frekvence je $f_{vz} = 22\,000\text{ Hz}$.

Perioda je tedy $T_{vz} = \frac{1}{f_{vz}} = 45,45\text{ ms}$.

Protože je prescaler (dělič vstupní frekvence) časovače TC1 vypnutý, frekvence, se kterou se inkrementuje čítací registr, je rovná f_{CLK} procesoru, tedy 16 MHz.

Čítací registr je 16-bitový, takže nabývá hodnot 0 až 65535. Abychom získali hodnotu, na kterou registr přednastavit, musíme odečíst poměr výstupní a vstupní frekvence od maximální hodnoty registru+1, tedy:

$$\text{hodnota registru} = (65535 + 1) - \frac{f_{CLK}}{f_{vz}}$$

$$\text{hodnota registru} = (65535 + 1) - \frac{16 \cdot 10^6}{22 \cdot 10^3}$$

$\text{hodnota registru} = 64809$ – zaokrouhleno na celé číslo

Čítací registr TCNT1 se nastaví na vypočítanou hodnotu při každém zavolání tohoto podprogramu.

Výpočet a výstup pro D/A převodníky

První část procedury, která se provádí hned po nastavení čítacího registru, je posílání dat na výstup, kterým jsou dva D/A převodníky, resp. dvoukanálový převodník. Děje se tak pomocí SPI sběrnice, jíž je převodník připojen. Postup je následující:

1. Hodnota vzorků, které mají být poslány, se určuje podle parametrů načtených z polí sekvence, tak jak bylo popsáno v odstavci Hlavní program – bod 1.
2. Z tabulky (pole) vzorků pro daný průběh pole se načte hodnota podle horních osmi bitů akumulátoru prvního oscilátoru. Tato hodnota je potom bitově posunuta o 4 místa doleva, protože převodník je 12-bitový. Např. pro sinusový průběh:

`sineTable[accumulator>>8]<<4;`

3. Hodnota pro druhý oscilátor je určena podobně, jen podle akumulátoru pro druhý oscilátor, ke kterému je přičten parametr fáze.
4. Jedním z parametrů zadaných uživatelem je parametr volume, který je určen pro každý oscilátor zvlášť a nabývá hodnot 0 až 16. Těmito parametry jsou obě hodnoty, získané v krocích 2 a 3, vynásobeny a poté jsou obě vyděleny číslem 16,

aby zůstaly v mezích 0 až 4095, tedy maximem a minimem vstupních hodnot D/A převodníku.

5. Posledním krokem je samotné odeslání po SPI sběrnici.

Implementace debouncingu

1. Při stisku kteréhokoliv tlačítka je zavolán podprogram přerušení INT0 (viz výše), který zakáže reakci na jakýkoliv další stisk (`keyEnable = 0`) a provede činnost, která přísluší stisku daného tlačítka.
2. Při každém přetečení časovače TC1 se testuje, jestli je `keyEnable` 0 a pokud ano, inkrementuje se proměnná, nazvěme ji `debounce_count`, ve které je tím pádem uložena hodnota reprezentující čas, který uběhl od posledního nulování proměnné `keyEnable`, tedy od posledního stisku tlačítka (resp. nulování `debounce_count`, viz dále).
3. Při každém přetečení (jestliže `keyEnable = 0`) se dále testuje, zdali se již hodnota `debounce_count` vyšplhala k hodnotě 800 (800 odpovídá asi 36 ms). Jestliže ano, pak se načte stav portu, na kterém jsou připojena tlačítka. Jestliže žádné z nich není zmáčknuté, znovu se povolí reakce na stisk `keyEnable = 1`. Jestliže je některé pořád zmáčknuté, `keyEnable` zůstává nastaven na 0, vynuluje se také `debounce_count` a znovu se počítá do 800.

Z měření tlačítek víme, že 36 ms je doba dost dlouhá na to, aby kontakt tlačítka přestal kmitat. To, co je výše popsáno, prakticky znamená, že nemůže dojít k další reakci na stisk tlačítka v době kratší, než zmíněných 36 ms, a dříve, než budou všechna tlačítka znovu puštěna (nestisknuta), což se testuje v násobcích tohoto času.

Implementace dlouhého stisku tlačítek

Kromě reakce na klasický stisk tlačítek, je implementována i reakce na “dlouhý stisk”. Ten nastává ve chvíli, kdy je tlačítko drženo déle, než asi 680 ms. To je realizováno pomocí počítadla, podobně jako u debouncingu. Počítadlo pro dlouhý stisk `long_press_count` je inkrementováno při každém zavolání podprogramu přerušení TC1, pokud je zakázána reakce na stisk (`keyEnable = 0`), a nulováno, je-li `keyEnable = 1`. Pokud dosáhne `long_press_count` hodnoty 15000 (odpovídá 680 ms) a je stále zmáčknuto některé z tlačítek, je volána příslušná procedura k danému tlačítku, konkrétně:

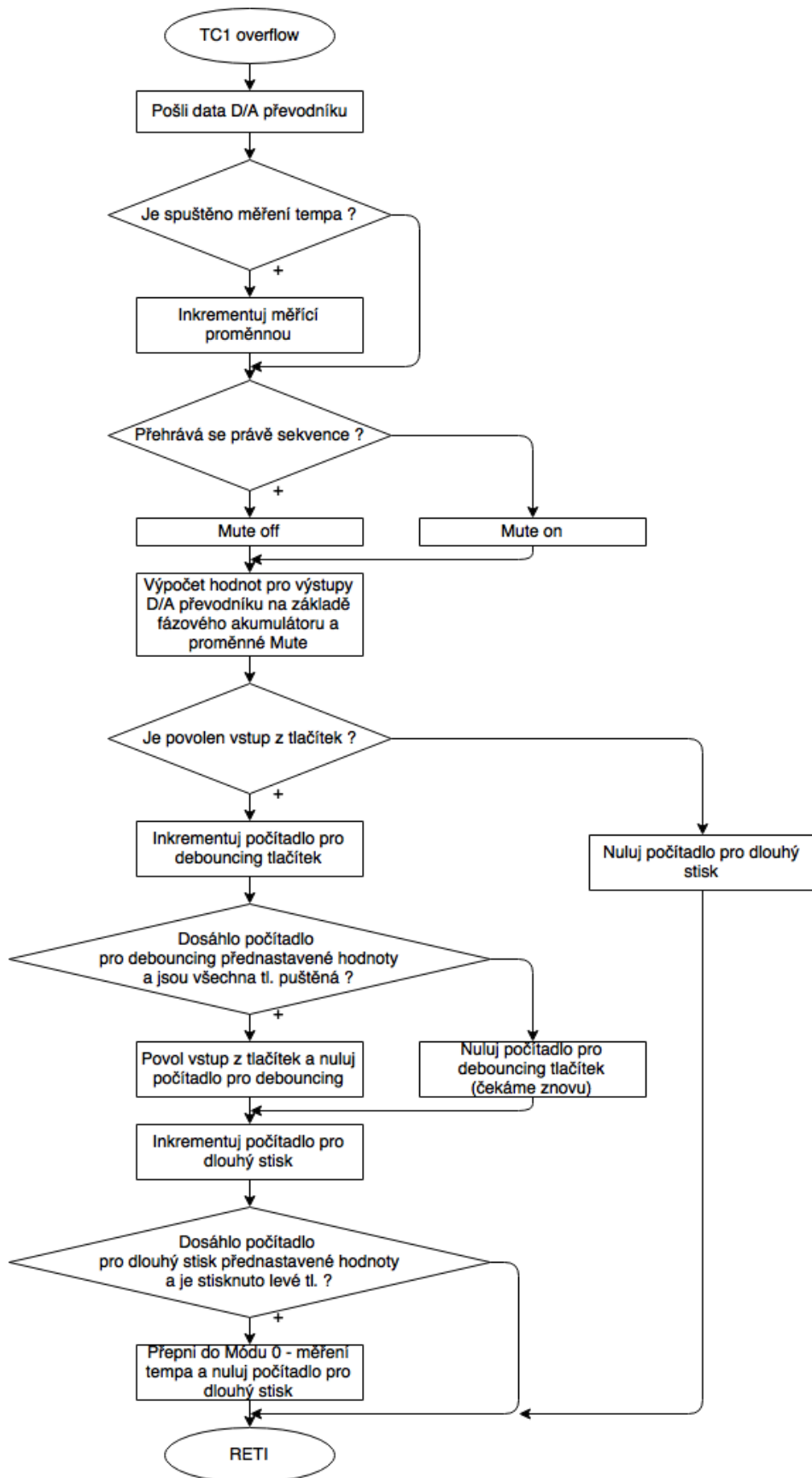
1. Levé tlačítko (`previous`) – přepnutí do módu 0 – nastavování tempa.

2. Tlačítko parametr / step preview – přehrávání aktuálně nastaveného kroku sekvence.

Měření času k nastavení tempa

Součástí podprogramu je ještě jedna činnost, která vyžaduje počítadlo a tou je měření času pro zadání nového tempa přehrávání sekvence. V podstatě jde jen o to, že se inkrementuje proměnná `step_time`, jestliže je mód nastaven na 0 a měření času je spuštěno. Hodnota této proměnné se pak zapíše jako nové tempo (viz. Podprogram přerušení INT1).

Vývojový diagram



3 Závěr

Tato práce pojednává o problematice týkající se hudební teorie, hudebních nástrojů, signálů, popisuje jednotlivé prvky obsažené v obvodu. Navazuje praktická část, ve které se zaměřuji na rozbor hardwarového a softwarového řešení. Soubor těchto jednotlivých částí vyústil v reálný funkční nástroj splňující cíle zadání. Výsledkem práce je tak mikrokontrolérem a pomocnými obvody realizovaný experimentální nástroj, který lze v praxi využít jako plnohodnotnou součást hudební produkce. Hlavními pilíři experimentálnosti nástroje jsou; možnost řízeného rozladění oscilátoru a také ovládání – spouštění a zastavování sekvence, nastavování tempa pomocí padu. V rámci této práce byl navržen a postaven kompletní obvod zajišťující spolupráci všech částí nezbytných pro sestavení a funkčnost nástroje, jednotlivé části jsou výše popsány a schéma je přílohou tohoto vypracování, další nezbytnou částí je software umožňující všechny požadované úkony, jeho nejpodstatnější části jsou popsány výše a samotný zdrojový kód je přiložen na CD, které je součástí této práce.

Vytvořený nástroj je plně funkční, jeho funkčnost dokazuje video, které je rovněž součástí přílohy na CD.

Při oživení nástroje a ověření jeho funkčnosti jsem se setkal s jediným nedostatkem zvoleného softwarového řešení, kterým je občasné lupnutí reproduktoru při přehrávání nastavené sekvence. Tento problém je způsoben skokovou změnou průběhů mezi jednotlivými kroky, která se odehrává v různých fázích průběhu. Řešením tohoto nedostatku by byl algoritmus, který by zajistil přechod mezi dvěma kroky pouze v tu chvíli, kdy je amplituda obou signálů například rovna nule, nebo když by se na sebe navazující průběhy nacházely ve stejné fázi průběhu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] GUŠTAR, Milan. *Elektrofony: historie, principy, souvislosti. Část I*, Elektromechanické nástroje. Praha: Uvnitř, 2007. ISBN 978-80-239-8446-0.
- [2] FORRÓ, Daniel. *Musitronika: Elektroakustické hudební nástroje. II. Analogové a analogově-digitální syntetizéry*. Brno: Janáčkova akademie múzických umění, 2001. ISBN 80-854-2950-0.
- [3] GUŠTAR, Milan. *Elektrofony: historie, principy, souvislosti. Část II*, Elektronické nástroje. Praha: Uvnitř, 2008. ISBN 978-80-239-8447-7.
- [4] William Duddel: Biography. Engineering and Technology History Wiki [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: http://ethw.org/William_Duddell
- [5] Thaddeus Cahill: Biography. Engineering and Technology History Wiki [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: http://ethw.org/Thaddeus_Cahill
- [6] Leon Theremin: Biography. Engineering and Technology History Wiki [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: http://ethw.org/Leon_Theremin
- [7] The ‘Melochord’, Harald Bode, Germany, 1947. 120 Years of Electronic Music [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://120years.net/the-melochordharald-bodegermany1947/>
- [8] Robert Moog: Biography. Engineering and Technology History Wiki [online]. [cit. 2017-06-02]. Dostupné z: http://ethw.org/Robert_Moog
- [9] SYROVÝ, Václav. *Technické základy elektroakustické hudby. 2., přeprac. vyd.* Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1990.
- [10] FORRÓ, Daniel. *Musitronika: Elektroakustické hudební nástroje. III. Digitální syntetizéry*. V Brně: Janáčkova akademie múzických umění, 2003. ISBN 80-85429-81-0.
- [11] SCHIMMEL, Jiří. *Studiová a hudební elektronika* [online]. Druhé vydání. Brno: VUT v Brně, FEKT, Ústav telekomunikací, Technická 12, 616 00, 2015 [cit. 2016-12-12]. ISBN 978-80-214-4452-2. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=61387
- [12] ZENKL, Luděk. *ABC hudební nauky*. Praha: Supraphon, 1976. Příručky ABC. ISBN 80-705-8284-7.
- [13] Modes of limited transposition. Qcpages [online]. [cit. 2017-06-02]. Dostupné z: http://qcpages.qc.cuny.edu/hhowe/music347/Messiaen_Modes_of_limited_transposition.pdf

- [14] SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [15] Linear Arithmetic synthesis. Revolvý. [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://www.revolvý.com/main/index.php?s=Linear%20Arithmetic%20synthesis>
- [16] CROMBIE, David. The complete synthesizer: a comprehensive guide. London: Omnibus Press, 1983. ISBN 0711900566
- [17] ROSSING, Thomas D. Springer handbook of acoustics. New York, N.Y.: Springer, c2007. ISBN 03-873-3633-8.
- [18] FORRÓ, Daniel. Musitronika: Elektroakustické hudební nástroje - IV. Samplery. Brno: Janáčkova akademie múzických umění, 2001. ISBN 80-85429-57-8.
- [19] Chapter 2. Oscillator Waveform Modification. Centre for Intelligent Machines [online]. [cit. 2017-06-03]. Dostupné z: http://www.cim.mcgill.ca/~clark/nordmodularbook/nm_oscillator.html
- [20] VRBA, Kamil. Analogová technika [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/resource/view.php?id=61588>
- [21] HANDBOOK OF OPERATIONAL AMPLIFIER APPLICATIONS. Texas Instruments [online]. Texas Instruments Incorporated, 2001 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://focus.ti.com/lit/an/sboa092a/sboa092a.pdf>
- [22] SCHIMMEL, Jiří. Elektroakustika [online]. Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav telekomunikací Purkyňova 118, 612 00 Brno, 2014 [cit. 2017-06-04]. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [23] Ask The Application Engineer: All About Direct Digital Synthesis. Analog Devices [online]. 2004 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-38/number-3/articles/all-about-direct-digital-synthesis.pdf>
- [24] Basics of Microcontrollers. CIRCUITS TODAY [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.circuitstoday.com/basics-of-microcontrollers>
- [25] 8-Bit AVR Microcontroller: ATmega32A DATASHEET COMPLETE. ATMEL CORPORATION [online]. Atmel Corporation, 2016 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-8155-8-bit-Microcontroller-AVR-ATmega32A_Datasheet.pdf
- [26] D/A převodníky. [Http://noel.feld.cvut.cz](http://noel.feld.cvut.cz) [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: http://noel.feld.cvut.cz/vyu/scs/prezentace2007/DA_prevodniky/

- [27] MCP4822 – System D/A Converters - Microchip. Microchip Technology Inc. [online]. [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20002249B.pdf>
- [28] Serial VS Parallel Interface. Newhaven Display [online]. Newhaven Display International [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: https://www.newhavendisplay.com/app_notes/parallel-serial.pdf
- [29] Serial Peripheral Interface (SPI). SparkFun Electronics [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi>
- [30] OLED technology: introduction and basics. OLED-info [online]. [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <https://www.oled-info.com/oled-technology>

Seznam použitých zkratek

AVR	Alf Vegard Riscprocessor, název architektury mikrokontrolérů
A/D	Analogově – digitální
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, technologie
CPU	Central Process Unit, centrální řídicí jednotka
DCO	Digitally Controlled Oscillator, číslicově řízený oscilátor
DDS	Direct Digital Synthesis, přímá číslicová syntéza
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, typ paměti
GND	Ground, uzemnění
I/O	Input/Output, vstup/výstup
ISP	In-System Programming, typ konektoru
JTAG	Joint Test Action Group, standard pro programování, apod.
kB	kilobyte
LFO	Low Frequency Oscillator, nízkofrekvenční oscilátor
LP	Low Pass, filtr typu dolní propust
LSB	Least Significant Bit, nejméně významný bit
MIDI	Musical Instrument Digital Interface, rozhraní
MISO	Master In Slave Out, nadřazený jako vstup, podřazený výstup
MOSI	Master Out Slave In, nadřazený výstup, podřazený vstup
MSB	Most Significant Bit, nejvýznamnější bit
OZ	Operační Zesilovač
OLED	Organic Light Emitting Diode
PWM	Pulse Width Modulation, pulzně šířková modulace
SCK	Serial Clock Input, název vstupu
SPI	Serial Periphery Interface, název rozhraní
RAM	Random Acces Memory, operační paměť

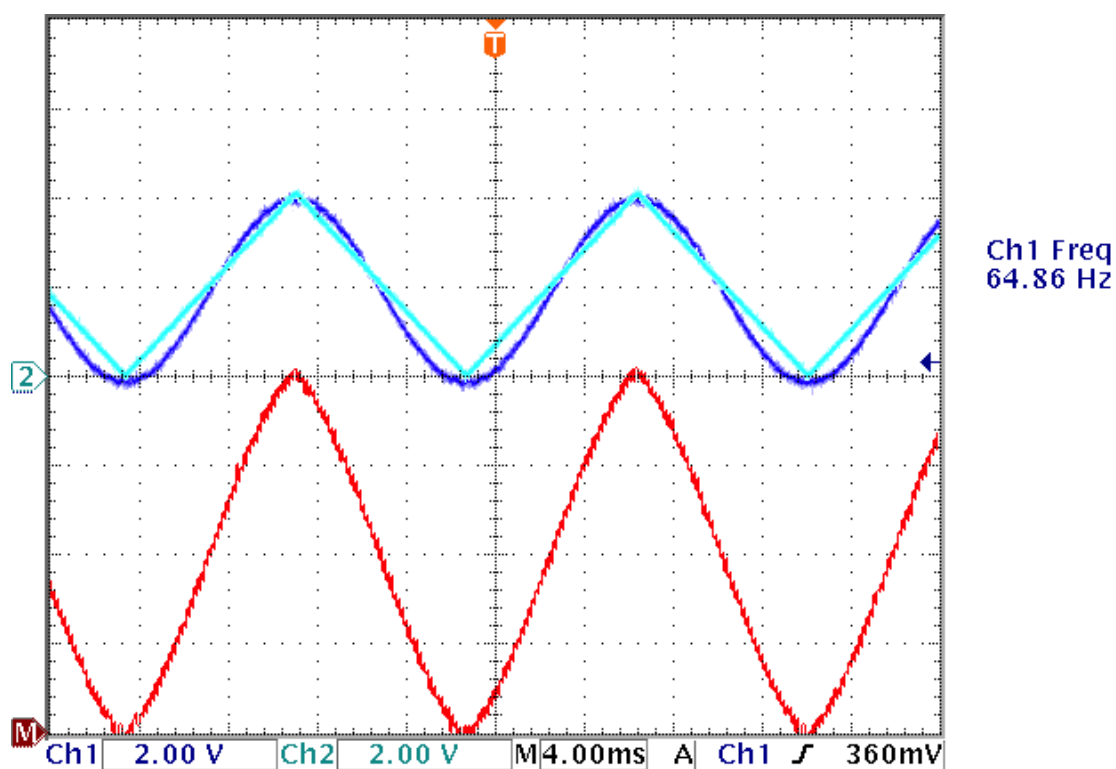
RISC	Reduced Instruction Set Computing, název architektury mikrokonotrolérů
SRAM	Static Random Acces Memory, statická operační paměť
VCA	Voltage Control Amplifier, zesilovač řízený napětím
VCO	Voltage Control Oscillator, napětím řízený oscilátor
V _{CC}	Označení pinu zdroje napětí

Seznam příloh

A. Snímky kombinací průběhů

A.1 Sinusový a trojúhelníkový signál

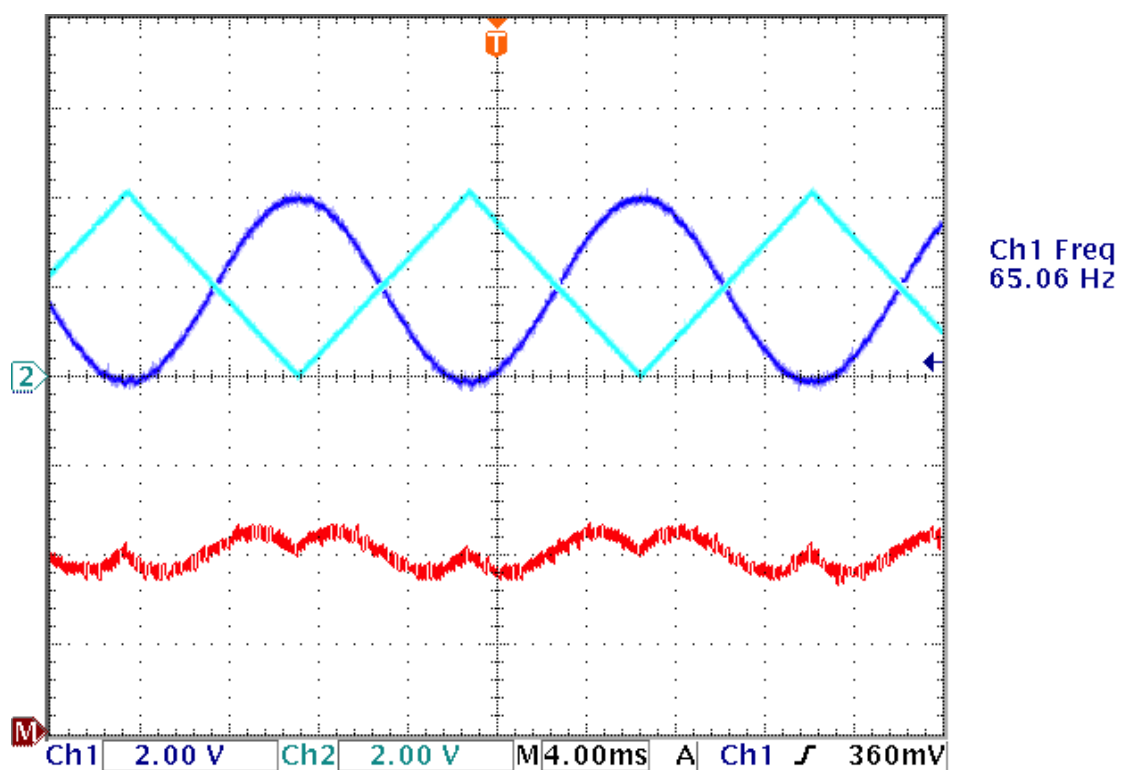
Snímek pořízený osciloskopem zapojeným v místě obvodu před sečtením obou kanálů D/A převodníku – horní dva modré průběhy reflektují dva průběhy signálu generované oscilátory a červený průběh je výsledkem součtu obou průběhů na výstupu nástroje. Signál na výstupu je kombinací sinusového a trojúhelníkového průběhu ve fázi s výslednou amplitudou rovnající se dvojnásobku původní velikosti.



Obr. A.1: Sinusový a trojúhelníkový signál

A.2 Sinusový a trojúhelníkový signál s fázovým posunem

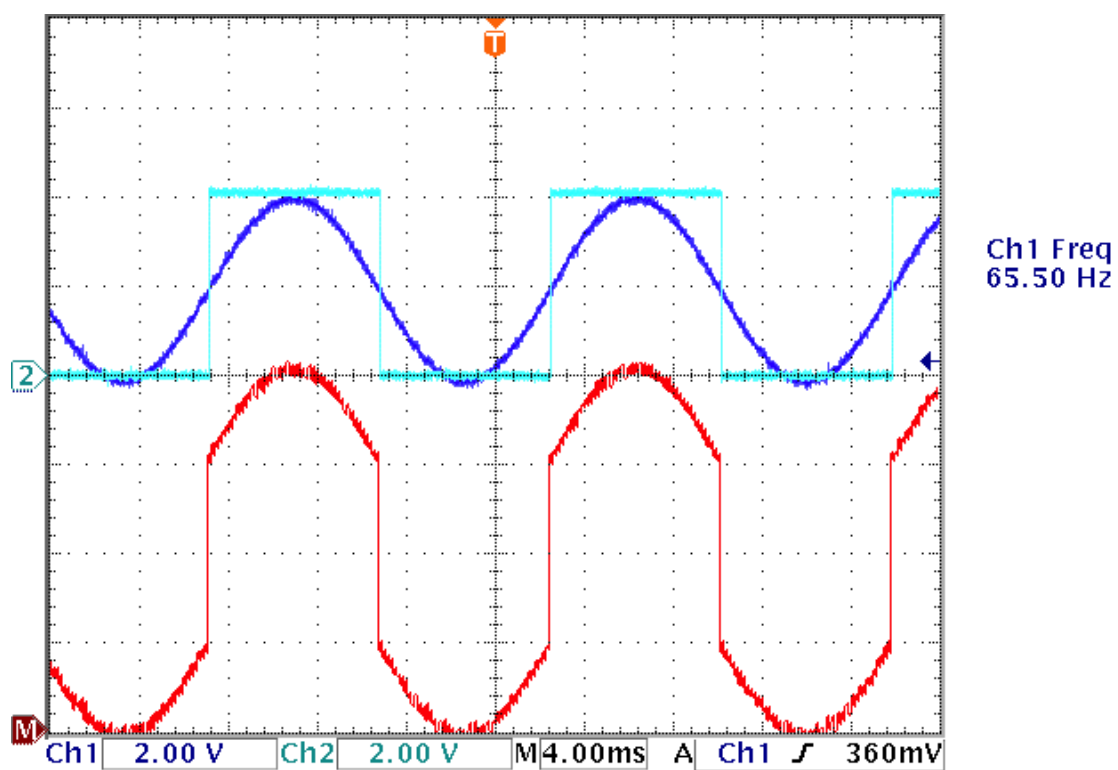
Kombinace signálů shodná s předchozím obrázkem, v tomto případě jsou však signály v protifázi (vzájemný posuv 180 stupňů).



Obr. A.2: Sinusový a trojúhelníkový signál v protifázi

A.3 Sinusový a obdélníkový signál

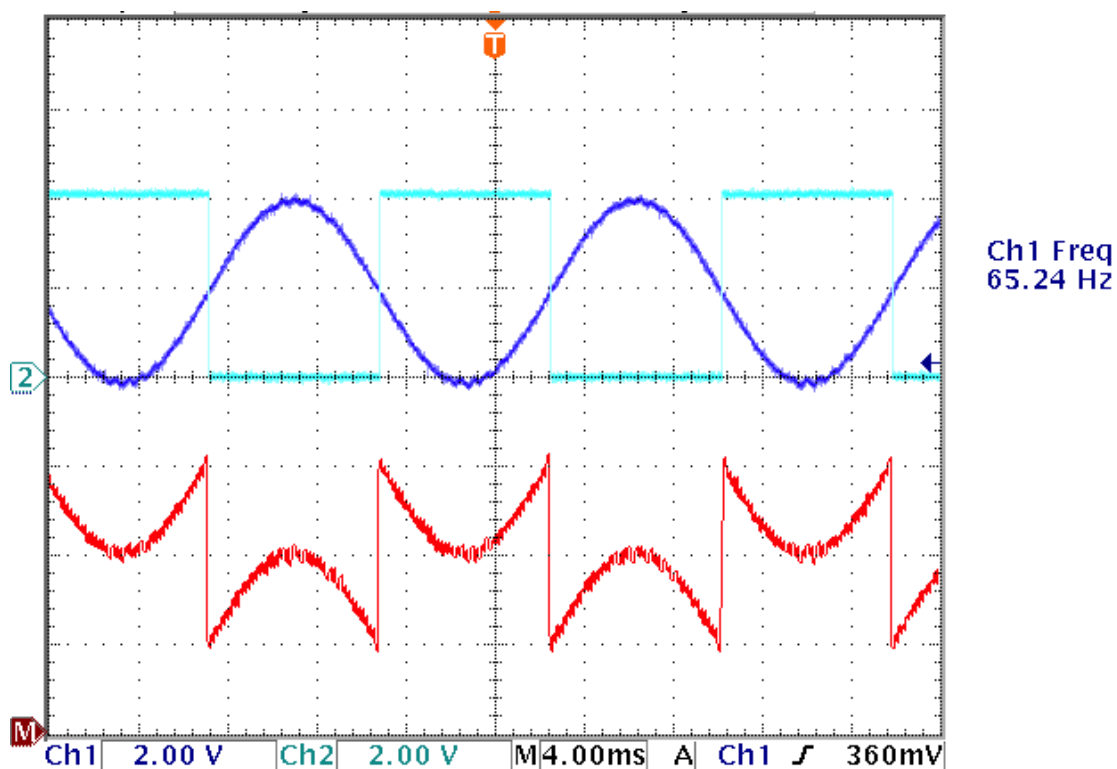
V horní části jsou zobrazeny signály na výstupu dvou kanálů D/A převodníku, ve spodní části je pak zobrazen signál vzniklý jejich součtem.



Obr. A.3: Sinusový a obdélníkový signál

A.4 Sinusový a obdélníkový signál s fázovým posunem

Na snímku je kombinace signálů se vzájemným fázovým posunem o 180 stupňů.



Obr. A.4: Sinusový a obdélníkový signál v protifázi

B. Schéma obvodu

Vytištěné schéma obvodu je přílohou bakalářské práce.

C. Přiložené CD

Přílohou této bakalářské práce je CD obsahující elektronickou verzi práce, software, schéma obvodu, dále je na CD přiloženo video, které demonstruje funkčnost nástroje, jednotlivá jeho nastavení, součástí přílohy na CD jsou také fotografie nástroje.